



HAL
open science

SPATIALISATION DU POTENTIEL DE RECHARGE DIFFUSE D'UN AQUIFÈRE LIBRE SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE PAR TECHNIQUES GÉOSPATIALES ET HYDROCHIMIQUES : CAS DE L'AQUIFÈRE DU HAOUZ (MARRAKECH, MAROC)

Ouassil Ait El Mekki

► **To cite this version:**

Ouassil Ait El Mekki. SPATIALISATION DU POTENTIEL DE RECHARGE DIFFUSE D'UN AQUIFÈRE LIBRE SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE PAR TECHNIQUES GÉOSPATIALES ET HYDROCHIMIQUES : CAS DE L'AQUIFÈRE DU HAOUZ (MARRAKECH, MAROC). Hydrologie. Université Cadi Ayyad Faculté Des Sciences Semlalia Marrakech (Maroc), 2017. Français. NNT : . tel-01725794

HAL Id: tel-01725794

<https://theses.hal.science/tel-01725794>

Submitted on 7 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



UNIVERSITÉ CADI AYYAD
FACULTÉ DES SCIENCES SEMLALIA
MARRAKECH, MAROC



N.° d'ordre : 172

N.°
d'ordre
172

M. Ouassil AIT EL MEKKI

THÈSE

Présentée à la Faculté des Sciences Semlalia
pour obtenir le Grade de :

Docteur

COLLÈGE DOCTORAL

CED : Sciences, Techniques & Ingénierie

Formation Doctorale : GéoSciences, Géo-Ressources et Environnement

Spécialité : Hydrologie et Hydrogéologie

SPATIALISATION DU POTENTIEL DE RECHARGE DIFFUSE D'UN AQUIFÈRE LIBRE SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE PAR TECHNIQUES GÉOSPATIALES ET HYDROCHIMIQUES : CAS DE L'AQUIFÈRE DU HAOUZ (MARRAKECH, MAROC)

Par :

M. Ouassil AIT EL MEKKI

(Master : Géodynamique, Géo-Ressources et Environnement)
(Ingénieur d'Application en Géosciences)

Présentée et soutenue publiquement le 29 avril 2017 devant le Jury d'évaluation :

Président	: Pr. Saïd KHABBA	PES	FSSM Université Cadi Ayyad Marrakech
Examineurs	: Pr. Abdelfattah BENKADDOUR	PES	FSTM Université Cadi Ayyad Marrakech
	: Pr. Salah ER-RAKI	PH	FSTM Université Cadi Ayyad Marrakech
	: Dr. Lionel JARLAN	HDR	CESBIO Toulouse France- LMI TREMA
	: Pr. El Khadir LAKHAL	PES	FSSM Université Cadi Ayyad Marrakech
	: Pr. Nour-Eddine LAFTOUHI	PES	FSSM Université Cadi Ayyad Marrakech

SPATIALISATION DU POTENTIEL DE RECHARGE DIFFUSE D'UN AQUIFÈRE LIBRE SOUS
CLIMAT SEMI-ARIDE PAR TECHNIQUES GÉOSPATIALES ET HYDROCHIMIQUES :
CAS DE L'AQUIFÈRE DU HAOUZ (MARRAKECH, MAROC)

2017 (G)



UNIVERSITÉ CADI AYYAD
FACULTÉ DES SCIENCES SEMLALIA
MARRAKECH, MAROC



N.° d'ordre : 172

THÈSE

Présentée à la Faculté des Sciences Semlalia
pour obtenir le Grade de :

Docteur

COLLÈGE DOCTORAL

CED : Sciences, Techniques & Ingénierie

Formation Doctorale : GéoSciences, Géo-Ressources et Environnement

Spécialité : Hydrologie et Hydrogéologie

SPATIALISATION DU POTENTIEL DE RECHARGE DIFFUSE D'UN AQUIFÈRE LIBRE SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE PAR TECHNIQUES GÉOSPATIALES ET HYDROCHIMIQUES : CAS DE L'AQUIFÈRE DU HAOUZ (MARRAKECH, MAROC)

Par :

M. Ouassil AIT EL MEKKI

(Master : Géodynamique, Géo-Ressources et Environnement)
(Ingénieur d'Application en Géosciences)

Présentée et soutenue publiquement le 29 avril 2017 devant le Jury d'évaluation :

Président	: Pr. Saïd KHABBA	PES	FSSM Université Cadi Ayyad Marrakech
Examineurs	: Pr. Abdelfattah BENKADDOUR	PES	FSTM Université Cadi Ayyad Marrakech
	: Pr. Salah ER-RAKI	PH	FSTM Université Cadi Ayyad Marrakech
	: Dr. Lionel JARLAN	HDR	CESBIO Toulouse France- LMI TREMA
	: Pr. El Khadir LAKHAL	PES	FSSM Université Cadi Ayyad Marrakech
	: Pr. Nour-Eddine LAFTOUHI	PES	FSSM Université Cadi Ayyad Marrakech

七転び八起き

和
仏
表
現

« *Sept fois à terre, huit fois debout* » (proverbe japonais)

DÉDICACE

À ma mère,

À mon père,

À ma grande mère,

À ma sœur,

À mon épouse,

À ma famille : Oncles, Tantes, etc...

À mes beaux-parents, mes belles-sœurs et mes beaux-frères,

À mes ancêtres,

À toute Personne qui me partage le sentiment de l'Amour,

Au reste démunis et défavorisés de l'humanité.

FICHE PRÉSENTATIVE DE LA THÈSE

- Nom et Prénom de l'auteur : M. Ouassil AIT EL MEKKI
- Intitulé de la thèse : **Spatialisation Du Potentiel De Recharge Diffuse D'un Aquifère Libre Sous Climat Semi-Aride Par Techniques Géospatiales Et Hydrochimiques : Cas De L'Aquifère Du Haouz (Marrakech, Maroc).**

Cette thèse s'est réalisée au sein du Collège Doctoral de l'Université Cadi Ayyad.
Centre d'Études Doctorales Sciences, Techniques et Ingénierie.
Formation GéoSciences, Géo-Ressources et Environnement.

- Directeur de thèse (Encadrant principal) : Pr. Nour-Eddine LAFTOUHI, (PES).
- Laboratoire et institution : Labo. Géostrutures, Géomatériaux et Ressources Hydriques, attaché à la Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech (Université Cadi Ayyad).
- Co-encadrant : Pr. Lahoucine HANICH, (PES).
- Laboratoire et institution : Labo. Géosciences, attaché à la Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech (Univ. Cadi Ayyad).

- Lieux de réalisation des travaux (laboratoires, institution,...) :
- Laboratoire des Géostrutures, Géomatériaux et Ressources Hydriques, département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech.
- Laboratoire Mixte International LMI-TREMA du 01/01/2011 au 30/06/2012.

- Période de réalisation de la thèse : du 1^{er} janvier 2011 au 31 octobre 2016.

Bourses obtenues :

- Bourse de 3^{ème} cycle délivrée par la Faculté des Sciences Semlalia du 01/01/2011 au 31/12/2011.
- Bourse délivrée par LMI-TREMA Marrakech du 01/01/2011 au 30/06/2012.
- Bourse d'excellence délivrée par le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique de Rabat (CNRST), du 01/01/2012 au 31/12/2014.

- Stages effectués :

- Dans le cadre de PHC Maghreb – 3025WL, du 29/09/2013 au 05/12/2013 à l'UFR des Sciences, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Rouen, France. Sous la supervision de Pr. Benoit LAIGNEL.

- Rapporteurs autres que le Directeur de thèse (nom, prénom, grade et institution) :

- Nom, prénom et grade : Pr. Saïd KHABBA, (PES).
- Laboratoire et institution : Labo. LMI (TREMA), attaché Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech.
- Nom, prénom et grade : Pr. El Khadir LAKHAL, (PES).
- Laboratoire et institution : Labo. d'Automatique, de l'Environnement et Procédés de Transfert, attaché à la Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech.
- Nom, prénom et grade : Pr. Salah ER-RAKI, (PH).
- Laboratoire et institution : Labo. de Procédés, Métrologie et des Matériaux pour l'Energie et l'Environnement, attaché à la Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech (Univ. Cadi Ayyad).

- Ce travail a donné lieu aux résultats suivants (communications, publications,...) :

- **Journal Publications (Articles) (3)**
 - **Ouassil Ait El Mekki**, Nour-Eddine Laftouhi: *Combinaison d'un système d'information géographique et de données de télédétection pour cartographier le potentiel de recharge des eaux souterraines dans les zones arides à semi-arides: le Haouz, Maroc*. Earth Science Informatics 07/2016; DOI:10.1007/s12145-016-0268-0
 - **Ouassil Ait El Mekki**, Nour-Eddine Laftouhi: *Un modèle empirique pour estimer la recharge des eaux souterraines dans les zones arides à semi-arides en utilisant le SIG et la télédétection, validé par la méthode de bilan de masse des chlorures. Le Haouz, Maroc*. Rendiconti Online Della Società Geologica Italiana 04/2016; DOI: 10.3301/ROL.2016.63
 - **Ouassil Ait El Mekki**, Nour-Eddine Laftouhi, Lahoucine Hanich: *Estimation du taux de recharge régionale des eaux souterraines dans la plaine centrale du Haouz, Maroc, en utilisant la méthode de bilan de masse des chlorures et un système d'information géographique*. Applied Water Science 09/2015; DOI:10.1007/s13201-015-0335-6

- **Conference Proceedings (Communications) (6)**
 - **Ouassil Ait El Mekki**, Nour-Eddine Laftouhi, Lahoucine Hanich: *Cartographie de la recharge potentielle des aquifères en zone aride à semi-aride en utilisant le SIG et la télédétection. Cas de la plaine du Haouz, Marrakech Maroc*. Colloque international : Application des technologies géospatiales en Géosciences, Faculté Polydisciplinaire de Taza; 10/2015
 - **Ouassil Ait El Mekki**, Nour-Eddine Laftouhi: *Un modèle empirique pour estimer la recharge des eaux souterraines dans les zones arides à semi-arides en utilisant le SIG et la télédétection, validé par la méthode de bilan de masse des chlorures. Le Haouz, Maroc*. AQUA 2015: Back to the Future! 42nd International Congress of International Association of Hydrogeologists Roma, Roma Italia; 09/2015
 - **Ouassil Ait El Mekki**, Nour-Eddine Laftouhi: *Détermination des modes de recharge des aquifères par l'utilisation de traceurs hydrochimiques et isotopiques*. The 5th Tunisian Days Of Applied Geology - JTGA 2013 & International Conference on Natural Hazards and Geomatics - ICNHG 2013, Hammamet Tunisia; 05/2013
 - **Ouassil Ait El Mekki**, Nour-Eddine Laftouhi, Zineb Zamrane: *Apport du MNT à l'affinement des études hydrologiques: Cas du bassin versant de Rheraya (Maroc)*. International Conference Of GIS users, Faculté Polydisciplinaire de Taza; 05/2012
 - **Ouassil Ait El Mekki**, Michel Le Page, Nour-Eddine Laftouhi, Lahoucine Hanich: *Apport du SIG à l'affinement des études hydrologiques : Cas du bassin versant de Rheraya (Maroc)*. International Conference on Water Environment and Resources: Water and Environment in a Changing World, Marrakech, Morocco; 11/2011
 - **Ouassil Ait El Mekki**, Nour-Eddine Laftouhi, Lahoucine Hanich, Lionel Jarlan, Michel Le Page: *Bilan et quantification des ressources en eau au niveau du Piémont en Milieu Semi-aride, Cas : Oued Rheraya avec la Plaine du Haouz (Maroc)*. 1st Water and Environment International Conference WATEIC, Marrakech, Morocco; 10/2011

CURRICULUM VITÆ

Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences Semlalia
Département des Sciences de la Terre
Marrakech, 40000, Maroc

o.aitelmekki@uca.ma

Website:

<http://orcid.org/0000-0001-5749-9584>

<http://www.researcherid.com/rid/G-8206-2016>



Ouassil Ait El Mekki (Mr.)

Hydrologue, Hydrogéologue et Géoinformaticien

Formation initiale

- Jan 2011 – Avril 2017* **Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia,**
Collège Doctoral, CED : Sciences et Techniques et Ingénierie,
Doctorat en Hydrologie et Hydrogéologie
Mention la plus élevée : Très honorable
Marrakech, Maroc
- Sep 2008 – Juin 2010* **Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia,**
Master Recherche : Géodynamique, Géo-Ressources et Environnements,
(Lauréat MAJOR)
Marrakech, Maroc
- Sep 2006 – Juin 2008* **Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques Marrakech,**
Maîtrise ès Sciences Spécialisées, Option : Métallogénie
(Ingénieur d'application)
Marrakech, Maroc
- Sep 2003 – Juin 2006* **Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques Marrakech,**
DEUG, SVT, option : Géologie
Marrakech, Maroc
- Juin 2003* **Lycée Cadi Ayyad**
Baccalauréat, Sciences expérimentales
Marrakech, Maroc

Teaching Experience

Jan 2012 – présent **Enseignant vacataire (Module informatique)**
Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia,
Marrakech, Maroc
Sections enseignées : SMP, SMC, STU et SVT.
Semestres: S1, S2, S3 et S4

Research Experience

Sep 2015 – présent **Reviewer**
Arabian Journal of Geosciences,
Springer

Aout 2015 – présent **Reviewer**
Applied Water Science,
Springer

Journal Publications (3)

Ouassil Ait El Mekki, Nour-Eddine Laftouhi: *Combination of a geographical information system and remote sensing data to map groundwater recharge potential in arid to semi-arid areas: the Haouz Plain, Morocco*. Earth Science Informatics 07/2016;
DOI:10.1007/s12145-016-0268-0

Ouassil Ait El Mekki, Nour-Eddine Laftouhi: *An empirical model to estimate groundwater recharge in arid to semi-arid areas using GIS and Remote Sensing, validated by Chloride Mass-Balance Method. The Haouz Plain, Morocco*. Rendiconti Online Della Societa' Geologica Italiana 04/2016;
DOI: 10.3301/ROL.2016.63

Ouassil Ait El Mekki, Nour-Eddine Laftouhi, Lahoucine Hanich: *Estimate of regional groundwater recharge rate in the Central Haouz Plain, Morocco, using the Chloride Mass-Balance Method and a geographical information system*. Applied Water Science 09/2015;
DOI:10.1007/s13201-015-0335-6

SOMMAIRE

Dédicace	v
Fiche présentative de la thèse	vi
Curriculum Vitæ.....	viii
Sommaire	x
Liste des figures	15
Liste des tableaux	17
Liste des équations	18
Liste des abréviations	19
Liste des institutions.....	19
Résumé.....	20
ملخص.....	21
Abstract	22
Introduction générale.....	23
Structure du manuscrit.....	24
Chapitre premier contexte de l'étude	25
1. Contexte géographique de la plaine du Haouz	26
2. Contexte climatique de la plaine du Haouz.....	27
3. Contexte géologique de la région du Haouz.....	28
3.1. Introduction	28
3.2. Cadre lithostratigraphie et paléogéographique de la région du Haouz.....	29
3.2.1. Précambrien.....	29
3.2.1.1. Précambrien ancien	29
3.2.1.2. Précambrien moyen.....	29
3.2.1.3. Infracambrien inférieur.....	29
3.2.2. Paléozoïque	29
3.2.2.1. Terrains anté-hercyniens	29
3.2.2.2. Stréphano-Antonien.....	29
3.2.3. Mésozoïque	30
3.2.3.1. Permo-Trias	30
3.2.3.2. Jurassique	30
3.2.3.2.1. Jurassique inférieur (Lias).....	30
3.2.3.2.2. Jurassique moyen (Dogger).....	31
3.2.3.2.3. Jurassique supérieur	31
3.2.3.3. Crétacé.....	31
3.2.3.3.1. Crétacé inférieur	31
3.2.3.3.2. Crétacé moyen.....	32
3.2.3.3.3. Crétacé supérieur.....	32
3.2.4. Cénozoïque.....	32
3.2.4.1. Éocène	32
3.2.4.2. Mio-Pliocène	32
3.2.5. Quaternaire	32
3.3. Conclusion.....	33
4. Contexte hydrogéologique (systèmes aquifères du Haouz)	34

Chapitre 2. Revue de la littérature (État de l'art)	35
1. Introduction	36
2. Définitions	37
2.1. Système à basse température.....	37
2.2. Zone saturée et non saturée	37
2.3. Charge hydraulique	38
3. Problématique de la recharge	39
4. Méthodes de mesurage	40
4.1. Fluctuations piézométriques.....	40
4.2. Méthode du bilan hydrique.....	40
4.3. Méthodes physiques	41
4.3.1. Gradient de charge hydraulique.....	42
4.3.2. Conductivité hydraulique	43
4.3.3. Méthode à cylindre unique	43
4.3.3.1. Objectif.....	43
4.3.3.2. Matériels.....	43
4.3.3.3. Méthode à suivre	44
4.3.3.4. Interprétation des Fig. 4 et 5.....	46
4.3.3.5. Avantages et limites	47
4.3.4. Méthode du double anneau.....	47
4.3.4.1. Principe et mise en place.....	47
4.3.5. Limite des méthodes physiques.....	48
4.4. Simulation hydrogéologique	48
4.5. Lois utilisées par le modèle	48
4.5.1. Lois utilisées.....	48
4.5.2. Hypothèses associées à la modélisation hydrogéologique	49
4.5.3. Méthodologie à suivre	49
4.5.3.1. Détermination du système aquifère.....	49
4.5.3.1.1. Géométrie	50
4.5.3.1.2. Lois régissant l'écoulement.....	50
4.5.3.1.3. Définition des paramètres hydrodynamiques (T, S).....	50
4.5.3.1.4. Conditions aux limites.....	50
4.5.3.1.5. Etat initial piézo-débit	50
4.5.3.2. Exploitation des données d'entrée.....	50
4.5.3.2.1. Données existantes	50
4.5.3.2.2. Campagnes de terrain	51
4.5.3.3. Structure du modèle.....	51
4.5.3.3.1. Définition des conditions aux limites	51
4.5.3.3.2. Définition des conditions initiales.....	52
4.5.3.4. Les simulations.....	54
4.5.3.4.1. Modélisation de la qualité	54
4.5.3.4.2. Description de la qualité de la simulation	54
4.5.3.4.3. Exemple des sorties de simulation	56
4.5.3.4.4. Difficultés de la modélisation.....	56
4.6. Méthodes géochimiques et isotopiques.....	56
5. Conclusion.....	58

Chapitre 3. Conception d'un nouveau modèle empirique estimant la recharge potentielle des aquifères dans les zones arides à semi-arides à l'aide du SIG et de la télédétection. Cas de la plaine du Haouz, Marrakech Maroc	59
Résumé.....	60
1. Introduction.....	61
2. Matériel et méthodes.....	63
2.1. Zone d'étude.....	63
2.2. Méthodologie.....	63
2.2.1. Lithologie.....	63
2.2.2. Densité de drainage.....	66
2.2.3. Pente.....	66
2.2.4. Linéaments.....	66
2.2.5. Sols.....	66
2.2.6. Précipitations.....	67
2.2.7. Occupation du sol et couvert végétal.....	67
2.3. Facteurs influençant le potentiel de la recharge de la nappe.....	67
2.4. Formule d'estimation du potentiel de la recharge de la nappe.....	70
3. Résultats.....	71
3.1. Calcul de la valeur de chaque paramètre.....	71
3.1.1. Lithologie.....	71
3.1.2. Occupation du sol et couvert végétal.....	71
3.1.3. Densité de drainage.....	71
3.1.4. Pente.....	75
3.1.5. Sol.....	75
3.1.6. Densité des linéaments.....	76
3.1.7. Précipitations.....	76
3.2. Calcul de la contribution de chaque facteur.....	81
3.2.1. Évaluation des côtes.....	81
3.2.2. Détermination des poids.....	83
3.2.3. Détermination des indices d'infiltration.....	85
3.2.4. Conception du modèle empirique estimant la recharge potentielle.....	86
4. Discussion.....	87
5. Conclusion.....	89
Chapitre 4. Détermination du taux de recharge des aquifères par le biais du bilan de chlorures en zone aride à semi-aride. Cas du piémont du Haouz Central : Rheraya, Issil et Ourika, Marrakech Maroc	90
Résumé.....	91
1. Introduction.....	92
2. Matériel et méthodes.....	94
2.1. Zone d'étude.....	94
2.2. Méthodologie.....	97
2.2.1. The Chloride Mass-Balance Method (CMB).....	97
2.2.2. Détermination des variables.....	98
2.2.2.1. Détermination des précipitations efficaces annuelles (P) du Haouz Central.....	98
2.2.2.2. Détermination de la concentration.....	98
2.2.2.2.1. Échantillonnage.....	98
2.2.2.2.2. Détermination des concentrations en chlorures du Haouz Central.....	99
2.2.3. Spatialisation de la pluviométrie et des concentrations des chlorures du Haouz Central.....	99

3. Résultats	100
3.1. Précipitation du Haouz Central	100
3.2. Concentration des chlorures des eaux pluviales et souterraines du Haouz Central.....	101
3.3. Carte de la recharge régionale du Haouz Central	103
4. Discussion	105
5. Conclusion.....	107
Chapitre 5. Évaluation du modèle empirique par bilan de chlorures et application sur 45 ans.....	108
Résumé.....	109
1. Introduction	110
2. Matériel et méthodes	113
2.1. Zone d'étude.....	113
2.2. Méthodologie	113
2.2.1. Rappel du modèle empirique.....	113
2.2.2. Bilan de chlorure (CMB).....	113
2.2.3. Validation du modèle	114
2.2.3.1. Estimation de la précision	114
2.2.3.1.1. Erreur Absolue Moyenne (MAE).....	115
2.2.3.1.2. Erreur Quadratique Moyenne (RMSE)	115
2.2.3.1.3. Moyenne Quadratique des Erreurs (MSE)	115
2.2.3.1.4. Coefficient de Détermination (R^2).....	116
2.2.3.1.5. Pourcentage Moyen de l'Erreur Absolue (MAPE).....	116
2.2.3.1.6. Corrélation linéaire entre recharge calculée et recharge de référence.....	116
2.2.3.2. Valeurs utilisées	116
2.2.3.2.1. Valeurs calculées.....	116
2.2.3.2.2. Valeurs de référence obtenues par la CMB.....	118
2.2.4. Utilisation du modèle	118
2.2.4.1. Précipitations	118
2.2.5. Répartition spatio-temporelle	118
2.2.5.1. Répartition spatiale.....	118
2.2.5.2. Répartition temporelle.....	118
2.2.5.3. Détermination des cycles de recharge du piémont du Haouz Central	119
2.2.5.3.1. Définition des ondelettes	119
2.2.5.3.2. Transformée en ondelettes continues et discrètes.....	119
2.2.5.3.3. Logiciels utilisés.....	119
2.2.5.3.4. Traitement du signal.....	120
2.2.6. Relation pluie-recharge	120
2.2.6.1. Détermination des années sèches et humides.....	120
2.2.6.1.1. Variable centrée-réduite	120
2.2.6.1.2. Moyenne mobile.....	121
2.2.6.2. Influence de l'intensité de la pluviométrie sur la recharge.....	121
3. Résultats	122
3.1. Calculs pour l'année hydrologique 2011–2012.....	122
3.1.1. Détermination des précipitations.....	122
3.1.2. Détermination de la recharge empirique	122
3.2. Valeurs de référence obtenues par la CMB pour l'année hydrologique 2011–2012.....	125
3.3. Valeurs obtenues par le modèle.....	125
3.4. Estimation de la précision du modèle.....	125
3.5. Répartition spatio-temporelle de la recharge du Haouz	128
3.5.1. Répartition spatiale.....	128

3.5.2. Détermination des cycles de recharge	129
3.5.3. Relation pluie-recharge	137
3.5.3.1. Détermination des années sèches et humides du Haouz sur 45 ans	137
3.5.3.2. Influence de l'intensité de la pluviométrie sur la recharge.....	137
4. Discussion	141
5. Conclusion.....	143
Chapitre 6. Conclusion générale	144
Références	147
Annexes	163
Annexe 1. Diagramme de Piper des analyses chimiques du chapitre 4.	164
Annexe 2. Cartes de distribution spatiale de la recharge empirique pour 45 ans (1967-2012).....	165

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Plan de situation du Haouz	26
Figure 2 : Schéma représentant la zone saturée et la zone non saturée (Ressources naturelles Canada, 2012)	37
Figure 3 : Dispositif expérimental pour la loi de Darcy (1856)	42
Figure 4 : Dispositif du monocylindre et forme des tâches d'humectation en fonction des caractéristiques hydrodynamiques des sols (Roose et al., 1993)	45
Figure 5 : Dynamique de l'infiltration (Roose et al., 1993).....	46
Figure 6 : Principe de l'infiltromètre à double anneau.....	47
Figure 7 : Photo de l'infiltromètre à double anneau.....	47
Figure 8 : Schéma de localisation des forages de reconnaissance.....	52
Figure 9 : Schéma de conditionnement	53
Figure 10 : Schéma de l'interpolation	53
Figure 11 : Situation géographique de la zone d'étude	64
Figure 12 : Méthodologie adoptée pour la conception du modèle empirique pour l'évaluation du potentiel de recharge (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b)	65
Figure 13 : Relation multilatérale entre les sept facteurs régissant la recharge de l'aquifère du Haouz (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b).....	68
Figure 14 : Compilation et intégration des cartes thématiques des différents paramètres	70
Figure 15 : Lithologie du Haouz	72
Figure 16 : Occupation du sol et couvert végétal du Haouz.....	73
Figure 17 : Densité de drainage du Haouz	74
Figure 18 : Pente du Haouz	77
Figure 19 : Types des sols du Haouz.....	78
Figure 20 : Densité des linéaments du Haouz	79
Figure 21 : Précipitations du Haouz	80
Figure 22 : Échelle de l'intensité des sept paramètres régissant la recharge du Haouz	81
Figure 23 : Le modèle empirique calculant la recharge potentielle du Haouz développé par Ait El Mekki et Laftouhi (2016b).....	86
Figure 24 : La zone d'étude : le piémont du Haouz Central (Sous bassin de : Rheraya, Ourika et Issil) ..	95
Figure 25 : Photos des trois Oueds étudiés du Haouz Central	96
Figure 26 : Carte de distribution des précipitations (en mm/an) du Haouz Central de l'année hydrologique 2011–2012.....	100
Figure 27 : Carte de distribution des chlorures (en mg L ⁻¹) dans les eaux souterraines du Haouz Central ; année hydrologique 2011–2012	103

Figure 28 : Carte de distribution de la recharge spatialisée (en mm/an) du Haouz Central de l'année hydrologique 2011–2012.....	104
Figure 29 : Carte de distribution de la recharge spatialisée (en %) du Haouz Central de l'année hydrologique 2011–2012.....	104
Figure 30 : Carte du potentiel de recharge du Haouz (en %) tiré du Modèle développé par Ait El Mekki et Laftouhi (2016b)	117
Figure 31 : Code utilisé pour déduire le spectre d'ondelettes de la recharge par le logiciel R	120
Figure 32 : Carte de répartition des précipitations pour l'année hydrologique 2011–2012	123
Figure 33 : Carte de répartition de la recharge empirique du Haouz de l'année 2011–2012 déduite du modèle	124
Figure 34 : Présentation des résultats des formules statistiques déterminant l'erreur du modèle empirique	127
Figure 35 : Corrélation entre recharge calculée et recharge de référence	127
Figure 36 a : Distribution de la recharge spatiale pour 45 ans	129
Figure 36 b : Distribution de la recharge spatiale empirique de l'année la plus humide (1995-1996) de la série temporelle (45 ans)	130
Figure 36 c : Distribution de la recharge spatiale empirique d'une année intermédiaire (1984-1985) de la série temporelle (45 ans)	131
Figure 36 d : Distribution de la recharge spatiale empirique de l'année la plus sèche (1992-1993) de la série temporelle (45 ans).....	132
Figure 37 : Répartition mensuelle de la recharge moyenne du sous bassin de la Rheraya	133
Figure 38 : Répartition mensuelle de la recharge moyenne du sous bassin de l'Ourika	134
Figure 39 : Détermination des cycles de la recharge du sous bassin de la Rheraya par ondelettes continues	135
Figure 40 : Détermination des cycles de la recharge du sous bassin de l'Ourika par ondelettes continues	136
Figure 41 : Distribution de la variable centrée-réduite de la pluie et de la recharge au niveau du Haouz (1967–2012).....	138
Figure 42 : Corrélation entre précipitation et recharge au niveau du Haouz (moyenne annuelle d'une série temporelle de 45 ans (1967–2012)).....	139
Figure 43 : Évaluation des précipitations et recharge du Haouz (moyenne annuelle d'une série temporelle de 45 ans (1967–2012)).....	140

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Série stratigraphique du Haouz d'après : Ambroggi et Neltner (1952), Ambroggi et Thuille (1952), Thuille (1957) et Cochet (1962)	28
Tableau 2 : Subdivision en 3 groupes et 6 formations du Permo-Trias de la région d'Ourika (Biron, 1982)	30
Tableau 3 : Comparaison entre les sorties du Modflow® et Marthe®	55
Tableau 4 : Comparaison entre la perméabilité obtenue par Modflow® et Marthe®	55
Tableau 5 : Comparaison entre le bilan hydrologique obtenu par Modflow® et Marthe®	55
Tableau 6 : Principaux faciès constituant la plaine du Haouz	71
Tableau 7 : Classes de la densité de drainage de la plaine du Haouz.....	75
Tableau 8 : Classes et types des sols de la plaine du Haouz	75
Tableau 9 : Classification des paramètres régissant la recharge à la plaine du Haouz.....	82
Tableau 10 : Effet des facteurs, poids et taux de contribution de chaque facteur du Haouz sur l'infiltration profonde dans la région du Haouz.....	84
Tableau 11 : Détermination des indices d'infiltration et du taux de contribution des facteurs sur la recharge potentielle du Haouz.....	85
Tableau 12 : Catégories du potentiel de la recharge ainsi que leurs estimations quantitatives du Haouz..	87
Tableau 13 : Composition en chlorures (en mg L ⁻¹) des précipitations et des eaux souterraines du Haouz Central	101
Tableau 14 : Détermination de la précision du modèle développé par Ait El Mekki et Laftouhi (2016b)	125

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1	$I = P - (ETR + R + ds)$	41
Équation 2	$i = \frac{h}{l}$	42
Équation 3	$Q = K.A.i$	42
Équation 4	$D_d (km^{-1}) = \frac{\text{Longueur totale du réseau hydrographique (km)}}{\text{Superficie du bassin (km}^2\text{)}}$	66
Équation 5	$L_d (km^{-1}) = \frac{\text{Longueur totale des lineaments (km)}}{\text{Superficie du bassin (km}^2\text{)}}$	66
Équation 6	$I_i = \sum_{i=1}^n C_i \times W_i$	69
Équation 7	$W_i = E_M + E_m$	69
Équation 8	$Tx_i = \frac{I_i}{\sum I_i} \times 100$	69
Équation 9	$M_p R = \sum M_p F_i \times W_i \times Tx_i$	70
Équation 10	$R = \frac{P \times C_p}{C_i} - \frac{Q \times C_q}{C_i}$	98
Équation 11	$R = P \times \frac{C_p}{C_i}$	98
Équation 12	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i $	115
Équation 13	$RMSE(\hat{\theta}) = \sqrt{MSE(\hat{\theta})} = \sqrt{E((\hat{\theta}) - (\theta))^2}$	115
Équation 14	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y)^2$	115
Équation 15	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y)^2}$	116
Équation 16	$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{E_i - E_t}{E_i} \right $	116
Équation 17	$\forall t \in \mathbb{R}, \varphi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$	119
Équation 18	$z = \frac{P_i - \bar{x}}{\sigma}$	120

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ASTER GDEM : Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model

CC : Coefficient de Correction

CI : Chromatographie Ionique

Cl : Chlorure

CMB : Chloride Mass-Balance Method

DAPP : Densité Apparente

D_a : Densité de Drainage

DR : Densité Réelle

ETP : Évapotranspiration Potentielle

ETR : Évapotranspiration Réelle

H_p : Hauteur de la Profondeur

IDW : Inverse de la Distance Pondérée

I_i : Indice d'Infiltration

K : Conductivité Hydraulique

L_a : Densité des Linéaments

MAE : Mean Absolute Error (Erreur Absolue Moyenne)

MAPE : Mean Absolute Percentage Error (Pourcentage Moyen de l'Erreur Absolue)

MLC : Maximum Likelihood Classification

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MSE : Mean Squared Error (Moyenne Quadratique des Erreurs)

P : Précipitation Efficace

R² : Coefficient of Determination (Coefficient de détermination)

RMSE : Root-Mean-Square Error (Erreur Quadratique Moyenne)

S : Coefficient d'Emmagasinement

SIG : Systèmes d'Information Géographique

T : Transmissivité

T_{x_i} : Taux de Contribution

LISTE DES INSTITUTIONS

ABHT : Agence du Bassin Hydraulique du Haouz

CAC : Centre d'Analyses et de Caractérisation

ESRI : Environmental Systems Research Institute

FSSM : Faculté des Sciences Semlalia

NASA : National Aeronautics and Space Administration

UCA : Université Cadi Ayyad

RÉSUMÉ

Le Maroc, situé à l'extrême nord-ouest de l'Afrique, présente un climat aride et semi-aride sur la majorité de son territoire, où les précipitations sont très insuffisantes, généralement au-dessous de 300 mm/an avec une sécheresse progressive pendant les dernières décennies. Les apports annuels ne couvrent guère la demande en eau résultant de l'urbanisation, de l'agriculture, de l'industrie et du tourisme. La plaine du Haouz, au centre du Royaume, en est un exemple. Une gestion durable nécessite une gouvernance rigoureuse des ressources et des usages. Le taux de recharge des aquifères est un concept fondamental dans toute quantification de la ressource et sa gestion durable. Les outils d'aide à la décision reposent sur ce taux.

La présente étude a pour objectif de développer un modèle empirique de quantification de la recharge en se basant sur une analyse multicritères qui réunit les facteurs majeurs et mineurs déterminant l'infiltration potentielle. La méthodologie repose sur l'utilisation d'un Système d'Information Géographique, appuyé par la télédétection, pour générer des couches de données thématiques. Ces dernières concernent la variation spatiale des différents paramètres déterminant la recharge, les intégrant et les analysant pour en déduire la recharge potentielle spatialisée de l'aquifère. Cette approche a permis de déterminer le taux de recharge du Haouz (6 200 km²) allant de 3,5 à 19 %.

Ce travail repose aussi sur l'estimation du taux de recharge de l'aquifère au piémont liant le Haut Atlas et la plaine du Haouz Central par une méthode hydrochimique s'appuyant sur la relation développée par Eriksson et Khunakasem en 1969 : *Chloride Mass-Balance Method*. Il s'agit d'une procédure reposant sur la relation entre la concentration en chlorure des eaux souterraines et celle des eaux pluviales. La nouveauté de cette étude résulte de l'utilisation d'un Système d'Information Géographique permettant de calculer la recharge régionale des 400 km² du périmètre étudié. Cette approche a permis d'obtenir le taux de recharge spatialisé sous forme de carte, allant de 13 à 100 mm/an pour l'année hydrologique 2011–2012. Ce résultat permet aussi de valider les modèles empiriques sur de larges superficies dépassant les 6 200 km² comme la nappe du Haouz. En utilisant les données de l'année hydrologique précédente, le modèle assure des marges d'erreur inférieure à 15,5 %.

Mot clés : Recharge des aquifères ; Modèle empirique ; Système d'Information Géographique ; Télédétection; Chloride Mass-Balance Method (CMB) ; Climat aride et semi-aride ; Plaine du Haouz (Royaume du Maroc).

ملخص

تتواجد المملكة المغربية في أقصى غرب شمال القارة الإفريقية، و تعتبر من الدول التي تعاني من ظاهرة الجفاف التدريجي. يسود بجل المملكة مناخ قاحل و شبه قاحل حيث الموارد المائية السطحية المتوفرة لا تغطي الحاجيات. المنطقة الوسطى للبلاد الممتلئة في حوض الحوز تجسد هذه الظاهرة، حيث أن التوسع العمراني و السياحي و كذلك الفلاحي زيادة على التطور الصناعي و المنجمي أدى إلى الإجهاد المائي في المنطقة. لهذه الأسباب يتوجب تبني تدبير صارم و معقلن للحفاظ على إستمرارية هذا المورد الحيوي. معدل تطعيم المياه الجوفية معطى أساسي لحكامة جيدة و مستدامة لتسيير ممنهج للخزان الجوفي حيث أن نظم دعم القرار تتبني بالأساس على هذا المعدل.

يهدف هذا البحث العلمي إلى تطوير نموذج تجريبي يرمي إلى تقييم المعدل الجهوي لتطعيم المياه الجوفية بناء على تحليل متعدد المعايير الذي يجمع بين العوامل الرئيسية التي تحدد التغذية المحتملة للخزان الجوفي. و تقوم هذه الدراسة على استخدام نظام المعلومات الجغرافية، بدعم من بيانات الاستشعار عن بعد، لتوليد طبقات البيانات المواضيعية. و تتعلق هذه الأخيرة بالتباين المكاني لمختلف العوامل المحددة للتغذية. وقد استخدمت هذه المنهجية لتحديد معدل تغذية حوض الحوز (6200 كم²) حيث استخلصت نسبة التغذية المحتملة ما بين 3,5 و 19%.

كذلك يقدم هذا البحث العلمي طريقة حساب كمية تغذية المياه الجوفية في منطقة السطح المتواجدة بين سلسلة الأطلس الكبير و سهل الحوز الأوسط باستخدام طريقة هيدروكيميائية دقيقة. تركز هذه الأخيرة على العلاقة الرياضية المبتكرة من طرف إيريكسون و خوناكاسم (1969)، المسماة بطريقة موازنة كتلة الكلور. تركز هذه الطريقة على العلاقة الرابطة بين تركيز عنصر الكلور [Cl⁻] في المياه الجوفية و المياه السطحية المتمثلة في الأمطار و بين كمية هذه التساقطات (مم). أكد الباحثون لأزيد من خمسة و أربعين سنة على الفعالية الكبيرة لهذه الطريقة موضعيا. لكن إستخدامها جهويا يطرح إشكالية. تقدم هذه الدراسة حلا، و هو إستعمال نظام المعلومات الجغرافية كوسيلة ناجعة لتقييم نسبة التغذية جهويا ل 400 كم² من منطقة الدراسة. هذه المنهجية سمحت بإستخراج خريطة تمثل نسبة التغذية الجهوية التي تتراوح بين 13 و 100 مم/سنة خلال السنة الهيدرولوجية 2011-2012. كما أن هذه النتائج تسمح بالتحقق من صحة النماذج التجريبية المنجزة على مساحات شاسعة تتجاوز 6200 كم² مثل حوض الحوز. حيث أن النموذج المنجز لهذا الأخير حصل على نسبة هامش الخطأ أقل من 15,5%.

الكلمات المفتاحية: تغذية المياه الجوفية، مناطق قاحلة و شبه قاحلة، نموذج تجريبي، طريقة موازنة كتلة الكلور، نظم المعلومات الجغرافية، الاستشعار عن بعد، سهل الحوز (المملكة المغربية).

ABSTRACT

Morocco is located in the extreme northwest of Africa. Most of its territory has an arid and semi-arid climate. Rainfall is very low, usually less than 300 mm/year, with increasing periods of drought in recent decades. The annual levels of rainfall cannot meet the increasing demands from urban centres, agriculture, industry and tourism, particularly in the Haouz Plain (6,200 km² in area) in the centre of Morocco. Rigorous controls are required for the sustainable management of the scarce water resources in this region. The groundwater recharge rate is a fundamental concept in the quantification of water resources and their sustainable management, and many decision-support tools are based on this parameter. The aim of this study was to design an empirical model to estimate the groundwater recharge rate based on a multi-criteria analysis. The model combines both the major and minor factors that determine the potential infiltration. The method is based on the use of a geographical information system, supported by remote sensing, to generate thematic data. These data relate to the spatial variations in the various parameters determining the rate of recharge and were integrated and analysed to deduce the spatial distribution of the recharge. This approach allowed the groundwater recharge rate in the Haouz Plain to be estimated as ranging from 3.5 to 19 %.

The aquifer recharge rate in the piedmont region that links the High Atlas and the Central Haouz Plain was estimated using the chloride mass-balance hydrochemical method, which is based on the relationship between the chloride concentrations in groundwater and rainwater. The addition of a geographical information system made it possible to estimate the recharge rate over the whole 400 km² of the study area. The results are presented in the form of a map showing the spatialized recharge rate, which ranges from 13 to 100 mm/year and the recharge percentage of the total rainfall varies from 3 to 25 % for the hydrological year 2011–2012. This approach will enable the validation of empirical models covering areas >6,200 km², such as the Haouz nappe. Based on the previous hydrological year, the method confirmed a margin of error of less than 15.5 %.

Keywords : Groundwater recharge ; empirical model ; geographical information system ; remote sensing ; Chloride Mass-Balance Method (CMB) ; arid and semi-arid climate ; Haouz Plain (Kingdom of Morocco)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La plaine du Haouz, qui couvre environ 6 200 km², est l'une des plus vastes régions aquifères du Royaume. La ville de Marrakech en est la capitale. Un climat aride à semi-aride règne sur cette plaine. La seule ressource existante dans cette plaine est l'eau souterraine. Ces eaux ont été consommées à outrance afin d'alimenter les projets socio-économiques et agricoles et de soutenir l'extension de l'urbanisme et de l'industrie minière. Ces activités anthropiques consomment d'énormes volumes d'eau.

La succession d'années de sécheresse et le mode de gestion ont aggravé la situation du Haouz. Cette surexploitation s'est traduite à la fois par une dégradation quantitative manifestée par l'abaissement des niveaux piézométriques de l'aquifère et une dégradation qualitative causée par les rejets des eaux usées brutes, sans traitement, directement dans la nature. Ces derniers sont issus de décharges urbaines non contrôlées, de nombreuses activités industrielles génératrices de polluants dangereux et d'une agriculture moderne hors-norme. Une gestion optimale et rigoureuse doit donc être établie pour mettre fin à ces comportements irresponsables. La recharge des aquifères est un paramètre primordial prisé par les spécialistes afin d'assurer une gouvernance sage et durable de ce patrimoine vital.

Le présent travail de recherche a pour objet de proposer une méthode de quantification de la recharge diffuse de l'aquifère et de sa répartition dans le temps et dans l'espace. Ce nouveau modèle empirique, estimant le potentiel de la recharge conçu par la combinaison des facteurs régissant cette dernière, combine les techniques de la télédétection et les Systèmes d'Information Géographique. Un second objectif de ce travail est l'établissement d'une solution pour la généralisation du bilan de chlorure (CMB) ; une approche hydrochimique pointue, qui s'applique ponctuellement depuis son développement en 1969 par Eriksson et Khunakasem. Sa généralisation soulevait jusqu'à présent des difficultés, mais a pu être résolue par l'usage du SIG. Par la suite, cette thèse a procédé à l'évaluation du modèle empirique conçu suivant une approche statistique en utilisant des données de référence déduites par la CMB.

En raison de la taille gigantesque de la plaine, l'évaluation du modèle s'est particulièrement focalisé sur le piémont existant entre le Haut Atlas et le Haouz Central des sous bassins de la Rheraya, Issil et l'Ourika.

STRUCTURE DU MANUSCRIT

Le présent manuscrit a été rédigé suivant la forme proposée par le *Manuel de Rédaction Scientifique et Technique* (Boudouresque, 2013). Cette thèse est subdivisée en 6 chapitres :

Le 1^{er} chapitre intitulé « Contexte de l'étude » comporte le cadre général de l'étude ainsi que le contexte géographique, géologique et hydrogéologique du Haouz.

Le 2^{ème} chapitre intitulé « Revue de la littérature ou État de l'art » présente quelques définitions importantes et décrit les différentes méthodes et approches adoptées pour le calcul et l'estimation de la recharge des aquifères tout en mentionnant leurs avantages et limites par rapport au contexte de la région d'étude.

Les trois chapitres suivants sont rédigés sous forme d'articles de recherche scientifique, car ces derniers restent la meilleure façon de présenter un travail scientifique du point de vue de la clarté et de la concision. Ces trois chapitres évoquent l'essentiel, soit le matériel et les méthodes sans toutefois rentrer dans les détails pour alléger le texte. Chacun de ces chapitres a été le sujet d'une publication à part.

Le 3^{ème} chapitre intitulé « Conception d'un nouveau modèle empirique estimant la recharge potentielle des aquifères dans les zones arides à semi-arides à l'aide de SIG et la télédétection. Cas de la plaine du Haouz, Marrakech, Maroc » discute de la méthodologie suivie pour l'élaboration du nouveau modèle empirique proposé par cette étude.

Le 4^{ème} chapitre intitulé « Détermination du taux de recharge des aquifères par le biais du bilan de chlorure en zone aride à semi-aride. Cas du piémont du Haouz Central : Rheraya, Issil et Ourika, Marrakech Maroc » présente pour sa part la solution adoptée pour la régionalisation de la CMB.

Le 5^{ème} chapitre intitulé « Évaluation du modèle empirique par bilan de chlorure et application sur 45 ans » traite l'évaluation du modèle empirique par le biais d'une série de formules statistiques et de son application sur une période de 45 ans afin d'étudier la variabilité spatio-temporelle de la recharge du Haouz.

Le 6^{ème} chapitre intitulé « Conclusions générales » résume les différents résultats obtenus, discute les différentes conclusions tirées et évoque les perspectives d'avenir.

CHAPITRE PREMIER
CONTEXTE DE L'ÉTUDE

1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE DE LA PLAINE DU HAOUZ

Le Haouz de Marrakech et le bassin de Mejjate forment une plaine alluviale très vaste d'environ 6 200 km², entre la chaîne du Haut Atlas au sud et les chaînons de Jbilets au nord, entre les plateaux d'Essaouira, Chichaoua à l'ouest et les premiers versants du Moyen Atlas à l'est (Piqué *et al.*, 2007).

Le Haouz forme une dépression large d'environ 40 km et s'étend de l'est vers l'ouest sur plus de 150 km (Fig. 1).

Le climat plus humide des versants atlasiques est à l'origine de deux systèmes fluviaux (Sinnan, 2000) :

- système de la Tessaout et du Lakhdar qui perce la fermeture des Jbilets pour rejoindre le bassin de l'Oum Rbia ;
- système de Tensift qui rassemble les apports des Oueds atlasiques avec une source à Ras El Ain, dans la partie orientale du Haouz.



Figure 1 : Plan de situation du Haouz.

2. CONTEXTE CLIMATIQUE DE LA PLAINE DU HAOUZ

La diversité des stations météorologiques (Marrakech, Tahanaout, Agbalou, Sidi Rahal, Tafériat, Imine El Hammam, Barrage Lalla Takerkoust, Sidi Hssain, Sidi Bouothmane, Chichaoua et Abadla) réparties sur le Haouz révèle des éléments essentiels concernant le climat.

La région se caractérise en effet par (ABHT) :

- une pluviosité faible et irrégulière (255 mm/an) ;
- des températures moyennes mensuelles variant entre 17 °C et 20 °C. Les mois les plus chauds sont généralement juillet et août (25 °C à 29 °C sur l'Atlas et la plaine du Haouz et 19 °C à 24 °C dans les zones côtières). Le mois le plus froid est janvier (12 °C sur l'Atlas et la plaine du Haouz et 13 °C dans les zones côtières) ;
- une hydrométrie faible, mais une évaporation forte 2 300 mm/an mesurée à l'évaporomètre de Piche sur 20 ans.

La description de la pluviométrie du Haouz sera discutée largement dans les chapitres : 3, 4 et 5.

3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION DU HAOUZ

3.1. Introduction

Le Haouz de Marrakech est un bassin sédimentaire modérément subsidant. Il s'agit d'une fosse d'origine tectonique formée pendant le Tertiaire au Quaternaire, période lors de laquelle il y a une accumulation pendant le Néogène des formations détritiques continentales et fluviales issues du démantèlement de tous les faciès de la chaîne atlasique (Piqué *et al.*, 2007).

Le tableau 1 ci-dessous représente toutes les couches de la série géologique du Primaire au Quaternaire récent, lesquelles sont réparties de manière très inégale dans le sous-sol de la plaine (Ambroggi et Neltner, 1952; Ambroggi et Thuille, 1952; Thuille, 1957; Cochet, 1962).

Tableau 1 : Série stratigraphique du Haouz d'après : Ambroggi et Neltner (1952), Ambroggi et Thuille (1952), Thuille (1957) et Cochet (1962).

Division géologique		Faciès	Puissance maximale
Quaternaire récent		Sable, gravier et galets des Oueds. Formations consolidées, des terrasses. Limos de la plaine	50 m
Villafranchien		Conglomérats ± consolidés. Marnes gréseuses et calcaire lacustre.	100 m
Néogène continental		Marnes gréseuses roses, calcaire lacustre et conglomérats.	600 m
Éocène	Supérieur	Formations rouges continentales.	200 m
	Moyen & inférieur	Calcaire et sables phosphatés avec des niveaux de marnes jaunes.	50 m
Crétacé	Supérieur	Grès et marnes.	100 m
	Moyen	Calcaire, dolomite, marnes et marno-calcaire	100 m
	Inférieur	Marnes vertes et argiles rouges gypsifères.	200 m
Jurassique	Supérieur & moyen	Formations continentales à l'est marine à l'ouest, avec des calcaires et argiles.	200 m
	Moyen & inférieur	Calcaires lités surtout dolomitique à l'est. Marnes calcaires et marnes à gypse.	500 m
Stéphano-Autunien		Coulés de dolérites au sommet, argiles	1200 m
Trias		Conglomérats rouges avec dépôts de gypse et de sel.	-
Primaire		Schistes, grès et quartzites, calcaires du Dévonien.	6000 m à 8000 m

3.2. Cadre lithostratigraphie et paléogéographique de la région du Haouz

La plaine du Haouz et la chaîne du Haut Atlas ont connu une succession de période de sédimentation et d'érosion depuis le Précambrien jusqu'au Quaternaire. Le contrôle tectonique est un facteur dominant dans la sédimentation (Piqué *et al.*, 2007).

3.2.1. Précambrien

Il est constitué de Précambrien I, II et III (Michard, 1976) et constitue l'axe de la chaîne atlasique occidentale appelé l'Atlas de Marrakech.

3.2.1.1. Précambrien ancien

Le Précambrien ancien (I), profondément métamorphisé, contient des amphibolites injectées de lits des granitoïdes associés à divers gneiss.

3.2.1.2. Précambrien moyen

Le Précambrien moyen (II) est marqué par des granodiorites, des schistes, des quartzites et des granites post-tectoniques.

3.2.1.3. Infracambrien inférieur

L'Infracambrien inférieur (III) est représenté par des laves rhyolites andésites associées à des conglomérats.

3.2.2. Paléozoïque

3.2.2.1. Terrains anté-hercyniens

Ils sont purement sédimentaires, constitués par des pélites, grès, argiles, schistes, calcaires, etc. Ces terrains ont été plissés, schistosés et métamorphisés par l'orogénèse hercynienne.

3.2.2.2. Stréphano-Antonien

C'est une série épaisse dans le Haouz Oriental, constituée par des shales rougeâtres et verdâtres, alternant des grès. Il y a une apparition à la base des niveaux charbonneux très minces. Les terrains primaires forment une grande partie du Haut Atlas de Marrakech et des chaînes des Jbilet.

3.2.3. Mésozoïque

3.2.3.1. Permo-Trias

Il forme une série très épaisse de plus de 1 000 m d'épaisseur argilo-salifère avec des coulées de basaltes doléritiques au sommet d'environ 200 m d'épaisseur.

Le Permo-Trias de la région d'Ourika est subdivisé en 3 groupes et 6 formations (Biron, 1982). Le tableau 2 illustre cette subdivision.

Tableau 2 : Subdivision en 3 groupes et 6 formations du Permo-Trias de la région d'Ourika (Biron, 1982).

Étage	Groupe	Formation
Trias supérieur	Groupe 1	Formation 6 : silteuse et évaporitique avec un épisode volcanique vers le haut.
	Groupe 2	Formation 5 : gréseuse. Formation 4 : silteuse. Formation 3 : conglomératique et calcaire.
Permien	Groupe 3	Formation 2 : silto-gréseuse. Formation 1 : gréso-conglomératique.

3.2.3.2. Jurassique

3.2.3.2.1. Jurassique inférieur (Lias)

Il est principalement développé à l'est de Marrakech où il atteint 400 m dans la région Tessaout. Il s'étale jusqu'à Oued N'Fis à l'ouest. Il est discordant sur le Trias et transgressif sur le Paléozoïque à l'ouest à partir de Oued Rheraya. À l'est, Ait Ourir, le Lias comporte (Ferrandini et Ferrandini, 1984) :

- un Lias inférieur, silto-argileux en accordance sur les coulées de basalte tholéitique du Trias supérieur ;
- un Lias moyen constitué de bancs calcaires dolomitiques et forme un bon à aquifère profond.

3.2.3.2.2. *Jurassique moyen (Dogger)*

Le Jurassique moyen contient 3 formations dans le secteur des cuvettes d'Ait Ourir qui sont, de bas en haut (Ferrandini et Ferrandini, 1984) :

- une formation conglomératique (épaisseur 15 à 30 m) ;
- une formation silto- gréseuse (épaisseur 10 à 20 m) ;
- une formation gréseuse (épaisseur 80 à 100 m) à chenaux conglomératiques.

Un faciès de type cargneule se développe au sommet de cette série rouge.

3.2.3.2.3. *Jurassique supérieur*

Dans le secteur d'Imintanout, le jurassique supérieur est représenté par une formation évaporitique et dolomitique d'environ 100 m d'épaisseur. Son faciès change brusquement à quelques kilomètres au nord de Chichaoua, devenant essentiellement calcaire gréseux avec une augmentation d'épaisseur.

3.2.3.3. *Crétacé*

3.2.3.3.1. *Crétacé inférieur*

Hauterivien-Valanginien :

Il constitue une épaisse série rouge de 300 m dans le secteur d'Imintanout formée d'argile et de grès au niveau d'Amez Miz où se retrouve cette série avec une épaisseur de 75 m.

Aptien-Barremien :

Dans le secteur d'Imintanout, cet ensemble de 120 m est essentiellement marneux avec de petites intercalations dolomitiques dévoilant le début d'une transgression marine.

Le faciès à Amez Miz devient gréseux et d'environ 25 m. L'Aptien-Barremien disparaît à l'est de l'horst de Guemassa.

Il est essentiellement marneux avec des intercalations de barre calcaire dolomitique. Dans le secteur d'Imintanout, l'Albien devient calcaire gréseux et constitue un bon repère morphologique jaune dans le secteur d'Ait Ourir.

Il affleure sur toute la bordure septentrionale de Marrakech entre Imintanout (800 m d'épaisseur) et Ait Ourir (35 m d'épaisseur).

3.2.3.3.2. Crétacé moyen

Cénomaniens :

À Imintanout, il atteint 320 m et est purement marneux avec des passages évaporitiques (gypse).

À Ait Ourir, le faciès devient plus argileux et l'épaisseur n'est plus que de 50 m.

Cénomano-Turonien :

Il est le repère morphologique de la bordure septentrionale du Haut Atlas de Marrakech. Il est également l'aquifère profond le plus important de la plaine du Haouz, son épaisseur diminuant régulièrement d'ouest à l'est.

3.2.3.3.3. Crétacé supérieur

Sénonien :

Il est totalement marneux avec des gypses et du grès rouges. Son épaisseur maximale est à discordant et transgressif sur le Sénonien à Imintanout. Il est constitué de marnes grises et de petites intercalations de barres de calcaire dolomitique. Au sommet apparaissent des grès et sables phosphatés d'une épaisseur de 140 m.

3.2.4. Cénozoïque

3.2.4.1. Éocène

Il forme un liseré discontinu sur la bordure nord de l'Atlas de Marrakech et est surtout conservé dans les fonds des synclinaux.

Le faciès varie peu entre l'est et l'ouest il s'agit généralement de formation calcaire (à coquilles ou à silex) ou dolomitique avec des intercalations marneuses ou gréseuses. Les calcaires et les marnes sont plus ou moins en phosphates. Son épaisseur diminue régulièrement de l'ouest vers l'est.

3.2.4.2. Mio-Pliocène

Les dépôts sont essentiellement continentaux avec du niveau marneux à la base. Il forme le substratum de la nappe quaternaire.

3.2.5. Quaternaire

Les sédiments quaternaires sont les produits du démantèlement de la chaîne atlasique par une série d'Oueds descendants tous de l'Atlas, sauf le Tensift, et traversant l'ensemble de la plaine du Haouz du sud vers le nord. Ces formations quaternaires sont le siège d'une nappe phréatique générale.

3.3. Conclusion

La dépression du Haouz recouvre deux bassins d'âges et de faciès différents :

- le premier, situé à l'est, d'âge triasique de liasique, est caractérisé par un faciès silteux, basaltique marneux et dolomitique ;
- le deuxième, situé au centre et à l'ouest, d'âge Jurassique Crétacé et Éocène, est caractérisé par un faciès gréseux marneux et calcaire.

Ces deux bassins sont recouverts par des molasses mio-pliocènes et par les alluvions quaternaires.

Ait Ourir forme la limite de deux bassins, où il renferme la série complète (Lias-Éocène).

4. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE (SYSTÈMES AQUIFÈRES DU HAOUZ)

L'hydrogéologie du Haouz a fait l'objet d'un grand nombre d'études, datant pour les premières, des années 20s (Celier, 1925; Raynaud, 1925a; Raynaud, 1925b; Moret, 1931).

Dès le début du 20^{ème} siècle, les premiers travaux de géologie ont été réalisés par : Gentil (1906), Frödin (1922), Walter Fogg (1935), Demangeot (1944), Gottmann (1946), Ambroggi et Neltner (1952) et Ambroggi et Thuille (1952). À partir des années 50s, ces études ont été focalisées essentiellement sur la détermination de la structure, de la nappe phréatique et visent à établir des cartes de paramètres hydrodynamiques (transmissivité, perméabilité et coefficient d'emmagasinement).

Malgré des outils de travail efficaces, les modèles restent très limités en raison des incertitudes concernant les conditions aux limites et les paramètres hydrodynamiques. Plus récemment, des études hydrologiques ont été conduites dans le Haouz, aboutissant à une meilleure connaissance de la structure des réservoirs et leurs comportements (Moukhchane, 1983; Sinan, 1986; Sinan, 2000; Razouki, 2001; Abourida, 2007).

L'étude de Moukhchane (1983) a permis d'identifier les différents aquifères profonds situés sous la plaine du Haouz, en utilisant les données géologiques et géophysiques afin de préciser l'extension, la puissance et la productivité des différentes formations aquifères liasique, cénomano-turonienne, éocène et quaternaire.

L'étude réalisée par Sinan (2000), principalement méthodologique, a permis de définir les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe phréatique et la relation existant entre ces paramètres géologiques et géoélectriques en milieu alluvial hétérogène, la transmissivité et la résistance transversale des diverses lentilles aquifères de la nappe du Haouz.

CHAPITRE 2. REVUE DE LA LITTÉRATURE (ÉTAT DE L'ART)

1. INTRODUCTION

Une bonne connaissance hydrogéologique est nécessaire pour le suivi et l'optimisation de la gestion durable des ressources en eau. Ces études s'appuient notamment sur des travaux géologiques, géophysiques, les sondages de reconnaissance et les essais de pompage.

Le taux de renouvellement des nappes constitue un facteur essentiel dans tout programme de développement durable basé sur l'exploitation des réserves en eaux souterraines. La grande diversité des méthodes proposées pour l'estimation de la recharge démontre l'importance, mais aussi la difficulté d'appréhender précisément cette variable dans toute tentative d'évaluation de ressources exploitables des aquifères (Gee et Hillel, 1988; Taupin, 1990; Aranyossy *et al.*, 1991; Aranyossy et Gaye, 1992).

Il n'existe pas de technique applicable à tous les cas, particulièrement dans les zones arides et semi arides. Le but de ce chapitre est de présenter l'état de l'art de mesurage de la recharge de l'aquifère. Cette variable peut se mesurer par différentes méthodes. Trois approches méthodologiques sont généralement employées : méthodes physiques, techniques lysimétriques et techniques hydrochimiques et isotopiques.

Les méthodes physiques sont basées sur des équations qui représentent la physique des transferts en milieu non saturé. Les grandeurs essentiellement mesurées sont la teneur en eau volumique et la pression effective de l'eau.

Les techniques lysimétriques estiment et évaluent les différentes composantes du bilan hydrique.

Les méthodes hydrochimiques et isotopiques sont les plus fréquemment employées dans les travaux de recherche au niveau de la zone non saturée. Elles permettent une évaluation de la recharge des nappes, en particulier la méthode du tritium et celle du bilan de chlorure.

2. DÉFINITIONS

Voici en premier lieu quelques définitions importantes.

2.1. Système à basse température

Ce système est caractérisé par une température ne dépassant pas 90 °C ($T < 90$ °C). L'intérêt de ces systèmes en hydrologie et hydrogéologie est que les réactions et les processus qui modifient les compositions isotopiques de l'eau sont trop lents pour causer des effets sensibles (Ressources naturelles Canada, 2012).

2.2. Zone saturée et non saturée

L'eau dans le sol et le sous-sol, en zone non saturée, existe sous plusieurs formes : l'eau mobile, l'eau de rétention et l'eau de constitution. Dans un terrain meuble, deux zones superposées sont généralement observables (Fig. 2) :

- En haut : la zone non saturée ; zone de terrain humide ;
- En dessous : la zone saturée dont les vides sont entièrement saturés par l'eau.

Zone non saturée

En zone non saturée, des forces d'adhésion fixent les molécules d'eau aux grains du squelette minéral, et ce, contre la force de gravité. Après un pompage prolongé d'eau dans un aquifère, la zone dénoyée reste humide, car il est impossible de récupérer toute l'eau d'une formation. Dans la zone dénoyée, les mouvements d'eau se font soit sous forme liquide (film humide se déplaçant) soit sous forme gazeuse (l'air des vides est saturé d'humidité). L'étude de la zone non saturée est très importante, car non seulement elle est le siège des racines des végétaux, mais elle constitue également une limite supérieure importante des nappes (alimentation, évaporation) et est le lieu de transit des polluants venant de la surface (Ressources naturelles Canada, 2012).

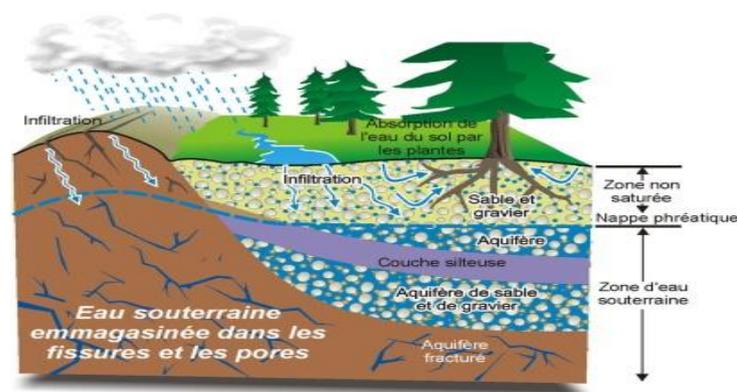


Figure 2 : Schéma représentant la zone saturée et la zone non saturée (Ressources naturelles Canada, 2012).

Trois types d'eau se distinguent dans la zone non saturée :

- **L'eau mobile** (eau libre ou eau gravitaire), circulant dans les macropores principalement sous l'effet de la gravité. Le début de mouvement de cette eau correspond à la capacité au champ ;
- **L'eau de rétention ou eau adsorbée** qui reste agglomérée sous l'effet des forces capillaires après écoulement de l'eau gravitaire. Cette pellicule est fortement associée à la matrice du sol par les forces électrostatiques et l'attraction moléculaire ;
- **L'eau de constitution**, partie intégrante des composés chimiques de la matrice et théoriquement non échangeable, au moins au cours de la percolation, résiste à une chaleur allant jusqu'à 105 °C à l'exception du gypse dont la déshydratation commence à 60 °C. Certaines eaux adsorbées par l'argile résistent à une chaleur supérieure à 105 °C.

Les paramètres pour décrire la zone non saturée et étudier le mouvement de l'eau du sol sont liés aux caractéristiques du sédiment matriciel. Les plus importants sont :

- **la texture** décrivant la répartition suivant la taille des grains des particules du sol ;
- **la structure** décrivant l'arrangement des particules en agrégats, isolées ou cimentées ;
- **la surface spécifique** qui prend en compte le phénomène d'adsorption de surface de l'eau et des solutés. Elle se définit comme la surface totale des particules par unité de masse ;
- **la composition minéralogique du sol.**

2.3. Charge hydraulique

Appelée aussi hauteur piézométrique, celle-ci correspond à la hauteur d'équilibre de l'eau en un point donné de l'espace, *i.e.* à la hauteur à laquelle s'élèverait et se stabiliserait l'eau pour se mettre en équilibre avec la pression atmosphérique (Banton et Bangoy, 1997).

3. PROBLÉMATIQUE DE LA RECHARGE

Le taux de renouvellement des nappes constitue le facteur essentiel de tout programme de développement durable basé sur l'exploitation des ressources en eaux souterraines. La grande variété des méthodes proposées (Gee et Hillel, 1988; Taupin, 1990; Aranyossy *et al.*, 1991; Aranyossy et Gaye, 1992) pour l'estimation de la recharge démontre l'importance ainsi que la difficulté d'estimer précisément cette variable essentielle dans toute exploitation quantitative des réserves en eau.

Selon Freeze et Cherry (1979), la recharge d'une nappe souterraine est le processus par lequel le surplus de l'infiltration sur l'évapotranspiration s'écoule à travers la zone racinaire et continue à circuler dans la zone non saturée en direction de la nappe, où il participe au renouvellement des réserves en eau. L'approche la plus évidente des problèmes d'infiltration devait donc être la mesure des flux de percolation à travers la zone non saturée. Toutefois, comme le font remarquer Allison *et al.*, (1983), Gee et Hillel (1988) et Fontes et Edmunds (1989), la complexité de cette zone n'a pas encore permis l'usage routinier de ces méthodes. À défaut, les hydrogéologues s'en sont remis à d'autres méthodes d'évaluation de l'alimentation des nappes, soit en reliant les variations piézométriques observées aux précipitations, soit en établissant un bilan d'eau à l'échelle d'un bassin versant.

Si dans les régions humides où les hauteurs des pluies sont supérieures à l'évapotranspiration, le bilan est généralement positif et la recharge des nappes est continue. Dans les zones semi-arides à arides, la forte évapotranspiration excède de loin la pluviosité annuelle. Il est alors nécessaire de vérifier si, avec le régime actuel des précipitations et la structure géologique du bassin versant, il existe une recharge des nappes, et le cas échéant, il convient d'en identifier le régime et d'en quantifier le taux.

En milieu semi-aride, le regroupement des pluies en une courte saison par rapport à une saison sèche beaucoup plus longue fait que l'évapotranspiration annuelle est supérieure à la lame d'eau précipitée. Cette différence négative ne représente évidemment pas le bilan réel de l'eau. De plus, les méthodes du calcul de recharge usuelles ne rendent pas compte du cheminement de l'eau dans la zone non saturée qui est le siège d'interactions très complexes, en particulier entre l'eau et le couvert végétal (Aranyossy, 1978).

4. MÉTHODES DE MESURAGE

4.1. Fluctuations piézométriques

Les variations du niveau piézométrique identifient l'infiltration vers les nappes souterraines, ce qui a mis en évidence la dépendance existante entre le régime permanent de pluie et celui du niveau de la nappe et son débit, *i.e.*. Le 2^{ème} dépendant du 1^{er}, la dépendance du régime permanent du niveau de la nappe et son débit où régime permanent de pluviométrie. La remontée du niveau d'une nappe par recharge est régie uniquement par la pluviosité annuelle.

Ces méthodes donnent de bons résultats quand il existe une seule source prédominante comme l'infiltration verticale sur une surface connue. Par contre, elles sont inopérables dans les situations où la zone non saturée présente de multiples sources ou lorsqu'une inégalité d'épaisseur existe dans cette zone. L'eau qui percole les zonalités plus épaisses met plus de temps à atteindre la nappe que celle qui s'infiltré au fond des dépressions. De ce fait, l'infiltration est surestimée dans les dépressions, et sous-estimée au niveau des points élevés (Tetia, 1990).

Les méthodes qui utilisent des variations de la piézométrie peuvent fournir des résultats intéressants en termes d'évaluation des ressources exploitables. Leur mise en œuvre nécessite l'identification des sources d'alimentation et la détermination de la part de chacune de ces sources dans l'eau qui s'infiltré, ce qui est très rarement réalisable (Ammary, 2007).

4.2. Méthode du bilan hydrique

Le calcul de la recharge se fait par une simple différence entre termes du bilan hydrique. Elle consiste à mesurer précisément l'évapotranspiration réelle et la pluie par des stations hydrométéorologique.

L'évapotranspiration réelle (ETR) est calculée à partir de la valeur potentielle de ETR, qui est elle-même calculée par des formules empiriques.

Un bilan très simple permet d'évaluer l'ETR par un intervalle de temps Δt puisque la relation suivante doit être établie (Équation 1). De même, l'équation de base du bilan de l'eau (conservation de masse) donne les différents chemins suivis par les précipitations en un lieu et en déduit la lame d'eau infiltrée.

$$\text{Équation 1} \quad I = P - (ETR + R \pm ds) \text{ (Banton et Bangoy, 1997)}$$

Où :

I : lame d'eau infiltrée en mm/an ;

P : précipitation moyenne annuelle en mm/an ;

ETR : évapotranspiration réelle en mm/an ;

R : ruissellement en mm/an ;

ds : variation du stocks dans le bassin versant.

En absence de méthode directe de la mesure de l'évapotranspiration, il est possible d'utiliser des formules empiriques comme celles proposées par : Blaney-Gride (1952), Makkink (1957), Penman-Monteith (1965), Turc (1961) et Priestley-Taylor (1972). Ces formules nécessitent l'intégration des paramètres météorologiques, pour évaluer avec précision le volume de l'eau évapotranspirée.

Par ailleurs, la diversité des sols et la complexité du comportement biologique rendent la détermination de la valeur réelle de l'évapotranspiration très difficile. Pour remédier à cela, le calcul de l'évapotranspiration totale réelle s'effectue indirectement à partir de l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui correspond à la limite maximale que peut atteindre l'évapotranspiration réelle.

Limites

Les méthodes de calcul de bilan d'eau à partir des données météorologiques conduisent à des imprécisions liées à la difficulté de l'estimation de l'évapotranspiration réelle.

En régions arides, et en raison des pertes de transmission (Renard, 1988) et de la variabilité spatiale des précipitations, ces méthodes ne permettent pas de quantifier la part des pluies efficaces réellement infiltrées et la part des pluies transformées en écoulements de surface qui ne peuvent être contrôlées *in situ*.

4.3. Méthodes physiques

Les méthodes physiques consistent à suivre, en continu, l'état d'humidité et de pression de l'eau dans le sol. Elles permettent de quantifier les flux d'infiltration effectifs des premiers mètres du sol vers la nappe, dans la zone non saturée. De telles méthodes présentent l'inconvénient d'une application très locale, à l'échelle du m², et la nécessité d'une instrumentation et d'un suivi très lourds (profils fréquents à la sonde à neutrons, relevés et entretien d'une batterie de tensiomètres). Elles ne se prêtent pas non plus à une analyse sur des sites multiples éloignés les uns des autres (Filippi *et al.*, 1990).

Ces méthodes sont basées sur la détermination des gradients de charge hydraulique et l'estimation de la conductivité hydraulique, lesquels permettent d'avoir une bonne estimation de l'infiltration *in situ*.

4.3.1. Gradient de charge hydraulique

Le quotient de charge hydraulique, h , par la longueur de la colonne de sable, l , ou perte de charge par unité de longueur, h/l , est défini comme le gradient hydraulique, noté i , sans dimension, comme présenté par l'Équation 2. La Fig. 3 et l'Équation 3 décrivent la loi de Darcy (1856).

$$\text{Équation 2} \quad i = \frac{h}{l} \text{ (Castany, 1982)}$$

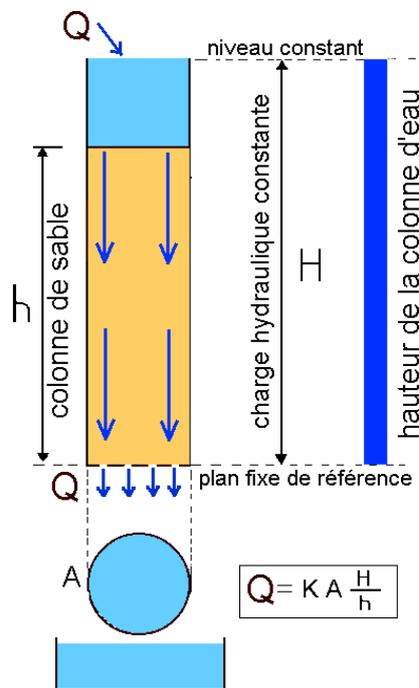


Figure 3 : Dispositif expérimental pour la loi de Darcy (1856).

$$\text{Équation 3} \quad Q = K \cdot A \cdot i \text{ (loi de Darcy (1856) simplifiée)}$$

Où :

Q : volume d'eau filtrant de haut en bas en m^3/s ;

K : coefficient dépendant de la perméabilité de la couche par Darcy (1856) en m/s ;

A : section totale, perpendiculaire à la direction verticale d'écoulement en m^2 ;

i : gradient hydraulique sans unité.

4.3.2. Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est un coefficient dépendant des propriétés du milieu poreux et de celles du fluide concerné, qui exprime l'aisance qu'a ce fluide à se déplacer à travers la tortuosité des vides, (Bear et Verruijt, 1998) ou encore l'aptitude du milieu poreux à laisser circuler ce fluide à travers ses pores. Elle s'exprime en (l/s) ou (v/t).

La conductivité hydraulique est une mesure de vitesse et peut aussi être exprimée en mètres par seconde (m/s) ou en mètres par jour (m/j). Une valeur de 10^{-9} m/s a été définie par convention comme imperméable. Dans certaines opérations d'enfouissement, ou de gestion environnementale, une valeur atteignant les 10^{-13} m/s peut être exigée pour le sol ou la membrane servant de plancher (e.g. un site d'enfouissement de déchets radioactifs) (Landry et Mercier, 1992).

Deux méthodes physiques ont été définies pour mesurer K :

- Méthode à cylindre unique (monocylindre), utilisée pour une mesure à forte pente (> 20 %) ;
- Méthode du double anneau, utilisée pour le mesurage à pente faible.

4.3.3. Méthode à cylindre unique

Cette méthode est simple, peu coûteuse et adaptée à des pentes atteignant 60 %, décrite par : Roose *et al.*, (1993) et Roose, (1996). Elle permet non seulement de classer les horizons d'une toposéquence en fonction de leur capacité d'infiltration, de leur porosité et de leur réserve en eau utile, mais également de visualiser le mode de circulation de l'eau d'un horizon aux suivants par comparaison avec les tâches d'humidité créées par l'infiltration (Roose et Smolikowski, 1997).

4.3.3.1. Objectif

Déterminer les valeurs d'infiltration d'un horizon au suivant et les principales caractéristiques hydrodynamiques d'un massif poreux.

4.3.3.2. Matériels

- Cinq cylindres de 10 cm de diamètre et 8 à 10 cm de hauteur, à bords biseautés vers le bas (une boîte de conserve d'un litre évidée peut convenir) ;
- Des papiers filtres rapides pour protéger l'état de la surface du sol lors du remplissage ;
- Un chronomètre ordinaire à la seconde près, un mètre pliant et une cuillère à soupe pour prélever les échantillons de sol à saturation ;
- Un litre d'eau propre par test, une pissette de 500 cm³ et un petit flotteur (paille) ;
- Une bêche et un couteau pour découper le profil humecté ;

- Un carnet quadrillé pour noter la forme des tâches d'humectation et les observations de terrain.

4.3.3.3. *Méthode à suivre*

- Choisir une zone représentative d'un état de surface d'un sol en période sèche ;
- Enfoncer délicatement et verticalement le cylindre en perturbant le moins possible la surface du sol ;
- Effectuer un léger coup de pissette mouillant l'intérieur du cylindre peut aider à faire pénétrer le cylindre de 2 cm dans le sol ;
- Assurer l'étanchéité en tassant le sol autour du cylindre et en y posant un cordon d'argile ;
- Poser un papier filtre couvrant le sol au fond du cylindre pour éviter de créer une suspension ;
- En versant l'eau, cette suspension pourrait former une croûte artificielle au cours de l'infiltration ;
- Poser une réglette de lecture du niveau de l'eau dans le cylindre (au mm près) ;
- Verser rapidement l'eau claire jusqu'à atteindre 50 mm à la réglette. Lire le temps T_0 ;
- Noter le temps de passage du niveau de l'eau à chaque cm de la réglette ;
- Après infiltration complète de 50 mm, remettre 50 mm d'eau et continuer le chronométrage ;
- Quand l'eau disparaît de la surface du sol (fin de la brillance de la surface), enlever rapidement le filtre et le cylindre, et prélever à la cuillère un échantillon de « sol détrempe »,
($H_p \text{ max.} \times DAPP = \text{porosité efficace pour la circulation de l'eau}$) ;
- Ou bien enfoncer le cylindre dans le « sol détrempe » peser la terre à $H_p \text{ max}$ puis après 24 à 48 heures après drainage libre sur bac à sable ($H_p \text{ 48 heures} \times DAPP = \text{capacité au champ ou microporosité}$). Le sécher à 105 °C pour déterminer la densité apparente sur le même massif ;
- Le broyer et faire bouillir pendant 4 heures 100 g de ce sol, laisser refroidir puis verser dans un ballon jaugé pour en déduire la densité réelle (DR). En déduire la porosité totale.
($\text{Porosité totale} = 100 (DR - DAPP) / DR$) ;
- Sur le terrain, dégager une fosse coupant la tâche humide au centre du cylindre initial jusqu'à atteindre la limite de la tâche d'humectation ;
- Dessiner la forme de la tâche dans la section perpendiculaire à la pente, et mesurer la profondeur humectée et le diamètre tous les 5 cm dont en déduisant le diamètre moyen de la tâche. La sensibilité du test est telle qu'il faut prévoir 5 répétitions et écarter les valeurs obtenues sur les cylindres où des méga-pores sont visibles au niveau de la tâche d'humectation. La répétition des mesures sur une tranchée en escalier permet de visualiser le fonctionnement hydrique de chaque horizon du profil ;

La Fig. 4 illustre le dispositif du monocylindre et les formes des tâches d'humectation en fonction des caractéristiques hydrodynamiques des sols et la Fig. 5 démontre le dynamisme de l'infiltration (Roose *et al.*, 1993).

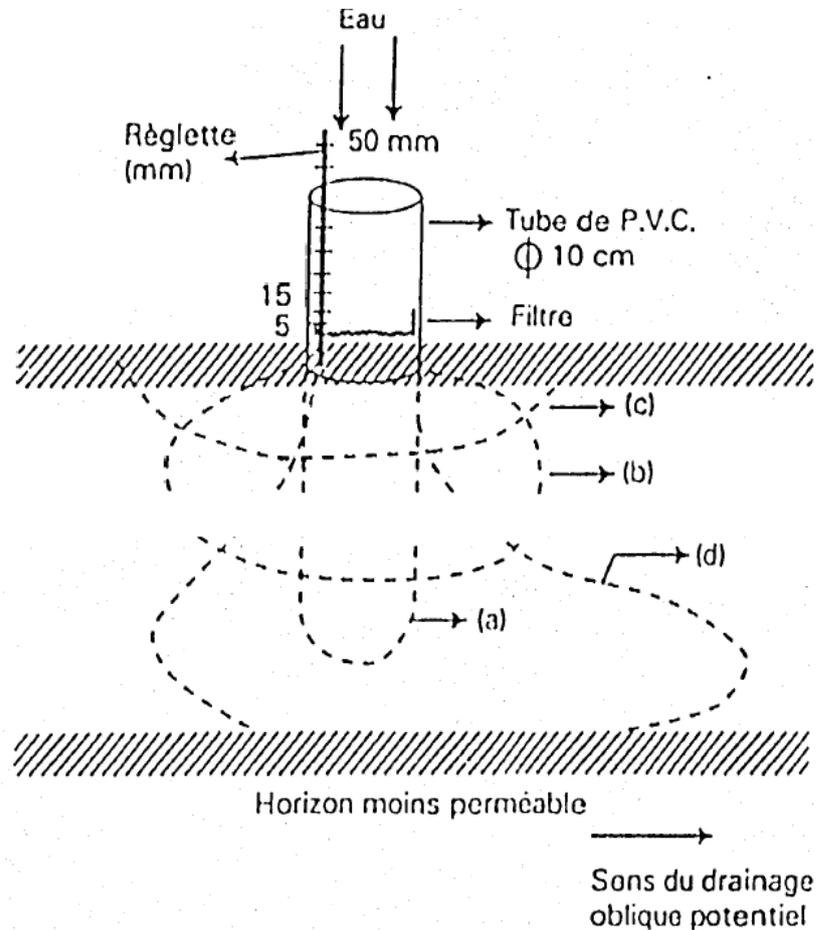


Figure 4 : Dispositif du monocylindre et forme des tâches d'humectation en fonction des caractéristiques hydrodynamiques des sols (Roose *et al.*, 1993).

Où :

- a : sols sableux très perméables ;
- b : sol sabloargileux perméable à porosité plus fine ;
- c : horizon peu perméable, tassé ou battu par la pluie ;
- d : horizon perméable surmontant un horizon moins poreux avec tendance au drainage oblique.

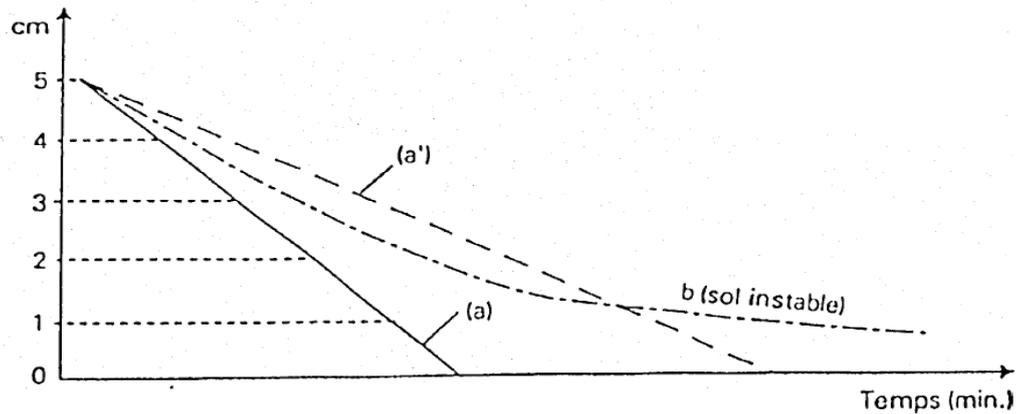


Figure 5 : Dynamique de l'infiltration (Roose *et al.*, 1993).

Où :

- a : sur un horizon sableux sec ;
- a' : sur le même horizon après humectation ;
- b : sur un horizon peu stable à l'eau.

4.3.3.4. Interprétation des Fig. 4 et 5

- 1) **Le chronométrage de l'infiltration** produit deux courbes ($H = f(\text{temps})$) dont la forme renseigne sur la stabilité structurale du massif poreux étudié, (Fig. 4). Leur pente en fin d'infiltration sur sol humide, sans pression, est une bonne estimation de K ; l'infiltration en milieu saturé.
- 2) **La forme des tâches humides** (Fig. 4) renseigne sur les différences d'infiltration des horizons successifs, sur la succion latérale et donc sur la microporosité et la texture du massif, sur les risques de drainage oblique et la résistance de chaque horizon à l'infiltration.
- 3) **Le diamètre moyen de la tâche** permet de corriger l'estimation de l'infiltration en fonction de la succion latérale :
le coefficient de correction (CC) :
 $(CC) = f(\text{volume des tâches}) = \pi.H.R^2 / \pi.H.r^2 = R^2/25$;
CC varie de 2 à 4 sur sols à comportement sableux ou argileux stables ;
CC varie de 4 à 10 sur sols argilo-limoneux instables ;
($F_n \text{ corrigé} = F_n \text{ mesuré} \times R^2/25$).
 r : Rayon du cylindre (cm).
 R : Rayon moyen de la tâche humide (cm).
- 4) Les autres caractéristiques hydriques peuvent être évaluées sur le même volume de sol.
- 5) La vitesse d'infiltration finale mesurée sur les dix derniers millimètres est toujours supérieure pour les tests sur sol sec et stable : elle tend vers 1 à 10 mm/h pour les sols instables humides, (Fig. 5).

4.3.3.5. Avantages et limites

Il s'agit d'un test rapide qui exige peu d'eau et permet une bonne compréhension du comportement de l'eau dans le profil et le long d'une toposéquence ; le matériel est très mobile, à portée de toutes les bourses. Cette méthode permet de définir les propriétés hydrodynamiques les plus utiles.

La mesure est limitée à 80 cm², elle est donc très sensible aux cailloux, fissures et n'est pas adaptée aux sols gonflants, fissurés, ou aux labours grossiers. Ce test donne souvent des valeurs relatives 10 fois supérieures aux mesures d'infiltration sous pluies simulées.

4.3.4. Méthode du double anneau

4.3.4.1. Principe et mise en place

Cette méthode mesure la vitesse d'infiltration qui est effectuée par un infiltromètre à double anneau. La procédure commence par l'implantation de 2 cylindres concentriques dans le sol. Le cylindre externe est rempli d'eau de façon à saturer le sol autour du cylindre interne et limiter l'écoulement latéral. Après remplissage des 2 cylindres, la mesure de la variation du niveau d'eau au cours du temps dans le cylindre interne s'effectue grâce à un manche gradué muni d'un flotteur à son extrémité. Par conséquent il aura l'obtention des mesures de la conductivité hydraulique du sol, comme illustré par les Fig. 6 et 7.

La vitesse d'infiltration est définie comme la quantité d'eau qui pénètre dans le sol par surface et par unité de temps.

Ce taux se calcule, selon la loi de Darcy, à partir des résultats des mesures. Plusieurs mesures sont conduites simultanément de sorte que le résultat donne une valeur moyenne très fiable.

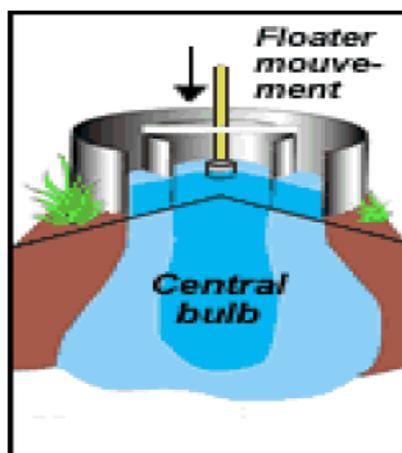


Figure 6 : Principe de l'infiltromètre à double anneau.



Figure 7 : Photo de l'infiltromètre à double anneau.

4.3.5. Limite des méthodes physiques

La précision des méthodes physiques reste insuffisante pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de la zone non saturée sous conditions naturelles (Aranyossy *et al.*, 1991). En effet, pour les valeurs d'humidité volumique très faibles, il est difficile de mesurer le potentiel de succion (h) et la conductivité hydraulique (K), ce qui rend incertaine la précision sur les faibles flux.

Les modèles physiques, basés sur la détermination des gradients de charge hydraulique et l'estimation de la conductivité hydraulique permettent de bénéficier d'une bonne estimation de l'infiltration sur le site d'essai. Cependant, l'application de ces méthodes à un bassin versant nécessite la multiplication des mesures pour tenir compte de la variabilité spatiale et des effets topographiques, ce qui augmente les coûts et rend la mise en œuvre de la méthode onéreuse.

4.4. Simulation hydrogéologique

Les modèles de simulation hydrogéologique sont basés sur la résolution de l'équation de diffusion établie à partir de la loi de Darcy et du principe de conservation de masse dans la zone saturée. La nappe est considérée comme un réseau de (n) mailles carrées, en attribuant à chaque maille ses données correspondantes. Le calage du modèle vient par la suite, lequel consiste à un ajustement sur la piézométrie étalon mesurée, celle calculée, en faisant varier par approximations successives les différents paramètres introduits.

Si les données de bases qui leur sont fournies sont fiables, ce qui n'est pas toujours le cas, les modèles de simulation hydrogéologique peuvent être très utiles pour une gestion à grande échelle et durable des aquifères.

Ci-dessous est détaillé le développement de la démarche de modélisation déterministe aux éléments finis décrite par Rescan.

4.5. Lois utilisées par le modèle

4.5.1. Lois utilisées

Les lois utilisées pour un modèle hydrogéologique maillé aux différences finies sont :

- la loi de conservation de la quantité de mouvement ;
- l'équation de continuité des compressibilités du milieu ;
- le modèle hydrodynamique associé (loi de Darcy (1856) pour les écoulements ; loi de Fick (1855) pour la diffusion des substances).

Le modèle de recharge est également indispensable, il est obtenu par un bilan de pluie efficace.

Un cas particulier est l'écoulement multiphasique (biseau salé *e.g.*). Il est alors possible d'introduire le paramètre S_w de saturation du fluide W (volume fluide/volume des vides) en supposant que la variation de la masse contenue dans le volume élémentaire est uniquement dépendante des variations de pression, sans effet de la température ou de la concentration.

4.5.2. Hypothèses associées à la modélisation hydrogéologique

Les hypothèses associées à la modélisation hydrogéologique sont citées par les points suivants :

- compressibilité des grains solides négligeable ;
- compressibilité de la matrice poreuse suppose un mouvement du solide qui négligeable ;
- une déformation du milieu ne peut être due qu'à un évènement exceptionnel (mouvement de terrain ou sismicité) ;
- en milieu saturé, la contrainte totale est la somme de la contrainte effective et de la pression ;
- relation linéaire entre le tenseur des déformations et le tenseur de variation des contraintes effectives ;
- la charge est constante sur une verticale ;
- la composante verticale de la vitesse est négligeable par rapport aux deux composantes horizontales.

4.5.3. Méthodologie à suivre

4.5.3.1. Détermination du système aquifère

L'étude hydrogéologique à proprement parler comprend les descriptions suivantes :

- Recouvrement de l'aquifère : nature, épaisseur, caractéristiques ;
- Caractéristiques de l'aquifère :
 - lithologie, extension ;
 - paramètres hydrodynamiques, zones préférentielles d'écoulement ;
 - piézométrie : bassin versant, direction, vitesse d'écoulement, variations temporelles ;
 - modalités de recharge (naturelles et induites) : zones préférentielles ;
 - relation eaux de surface-eaux souterraines ;
 - qualité des eaux ;
 - débit exploité ;
- Environnement et occupation des sols, aléas ;
- Facteurs économiques : évaluation des coûts des servitudes, solutions alternatives.

4.5.3.1.1. Géométrie

La cartographie géologique des horizons altérés est réalisée par reconstitution des paléo-surfaces à partir des données suivantes :

- logs de forage, géophysique ;
- modèles numériques de terrain (MNT) ;
- affleurements (dugwells) : la détermination de la superficie, du pendage et d'autres paramètres est possible à travers l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG).

4.5.3.1.2. Lois régissant l'écoulement

Les lois régissant l'écoulement se font par la loi de Darcy (1856), Équation de continuité, de conservation de la masse.

4.5.3.1.3. Définition des paramètres hydrodynamiques (T , S)

Cette définition est réalisée par un pompage de 72 h avec piézomètres associés. Il ne représente que la zone d'influence du pompage.

4.5.3.1.4. Conditions aux limites

Les conditions aux limites doivent être connues. Elles sont discutées ci-après.

4.5.3.1.5. État initial piézo-débit

Au préalable, il faut connaître l'état initial de la piézométrie et le débit.

4.5.3.2. Exploitation des données d'entrée

4.5.3.2.1. Données existantes

Les données d'entrée du modèle sont les suivantes :

- données de débit des cours d'eau surfaciques ;
- données de piézométrie issues des forages piézométriques et des forages d'exploitation ;
- données hydrologiques en amont de la zone d'étude (zone d'apport), afin d'estimer les recharges et décharges du système aquifère ;
- données des couches lithologiques permettant de définir les conductivités hydrauliques verticales et horizontales.

4.5.3.2.2. Campagnes de terrain

Généralement il faut réaliser un complément de données par le biais de campagnes de terrain ou de mesures au laboratoire :

- analyse granulométrique ou mesure au micromoulinet (mesure de K) ;
- campagne d'essai de pompage (mesure de T).

4.5.3.3. Structure du modèle

Un modèle hydrogéologique se compose de plusieurs couches de conductivité différentes. Ces couches interagissent entre elles de manière horizontale et verticale. La géométrie du domaine et les conditions aux limites associées jouent un rôle prépondérant sur la solution (Taux d'infiltration profonde). En général, une sous-estimation influencée par la distribution des conductivités hydrauliques et des sollicitations (pompage, recharge) peut être fournie. Les zones d'influence des puits peuvent être déterminées à partir de l'Équation générale de Thiem (1906) ou être estimées par les formules de Sichardt ou de Kusakin.

4.5.3.3.1. Définition des conditions aux limites

Les conditions aux limites imposent des charges hydrauliques particulières en plusieurs points géographiques de la zone d'étude.

Elles sont de plusieurs types :

- roches imperméables en bordure de domaine ;
- limite horizontale par une épente ;
- ruptures altimétriques ;
- surfaces libres (rivières, étendues d'eau) ;
- failles.

Condition de Dirichlet : valeur de charge imposée aux limites. *e.g.* les lacs et les rivières dont le niveau ne varie pas.

Conditions de Neumann ou conditions de flux : limité à un débit imposé, en établissant pour cela un gradient de charge pour une valeur de K donnée.

- Si $dh/dl = 0$: débit nul (limite imperméable) ;
- Si $dh/dl > 0$: débit imposé (entrée ou sortie d'eau).

Conditions de Fourier : combinaison de la charge et du gradient. Cas d'une rivière peu importante dont le niveau varie sous l'effet de la nappe.

Les limites artificielles sont quant à elles :

- les lignes de courant ;
- les lignes piézométriques ;
- les lignes de flux.

4.5.3.3.2. Définition des conditions initiales

- tenseur diagonal : K;
- milieu homogène et isotrope en absence de termes puits/sources (Équation de Laplace) ;
- cela revient à établir une piézométrie à $t = 0$;
- élaboration d'une grille de maille $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$;
- l'échelle du kilomètre est pertinente pour construire un modèle, c'est l'échelle généralement admise sous Modflow® ;
- génération des champs stochastiques de paramètres.

Il est important de bien différencier les faciès pour tenir compte de l'anisotropie verticale :

- faciès horizontal perméable / imperméable / peu perméable ;
- faciès vertical perméable / imperméable / peu perméable.

La régionalisation des paramètres de faciès s'effectue de la façon suivante :

Localisation des forages de reconnaissance :

Cette localisation est présentée par le schéma suivant (Fig. 8) :

*		*			
				*	
			*		
		*			
*					*
	*				

Figure 8 : Schéma de localisation des forages de reconnaissance.

Conditionnement :

i.e. l'assignation d'une valeur numérique particulière pour matérialiser la présence ou non d'un faciès particulier. Ceci est schématisé par la Fig. 9 :

1		0			
				1	
			0		
		1			
0					1
	1				

Figure 9 : Schéma de conditionnement.

Interpolation :

L'une des méthodes pertinentes dans ce cas est l'interpolation par krigeage avec variogramme linéaire, présentée par la Fig. 10.

1,00	0,47	0,00	0,13	0,21	0,14
0,64	0,81	0,69	0,09	1,00	0,01
0,01	0,16	0,15	0,00	0,52	0,72
0,26	0,78	1,00	0,27	0,14	0,11
0,00	0,37	0,63	0,42	0,43	1,00
0,89	1,00	0,50	0,95	0,81	0,84

Figure 10 : Schéma de l'interpolation.

Génération des pseudos puits :

Les campagnes sismiques permettent de définir des cartes d'impédance et ainsi de révéler des anomalies géologiques à ajuster dans le modèle. Le logiciel Meresim permet *e.g.* de réaliser de telles simulations.

4.5.3.4. Les simulations

Les simulations peuvent être de deux types : stochastique en faciès ou en perméabilité.

4.5.3.4.1. Modélisation de la qualité

La modélisation qualité prend en compte la capacité épuratoire du milieu, exprimée par :

- dilution ou reprise de la substance par les rivières ;
- dénitrification ;
- absorption par les végétaux.

La première démarche pour entreprendre une modélisation qualité de nappe est de caler un modèle de nappe sur la piézométrie et les débits en rivière.

Dans le cadre d'une modélisation qualité, le facteur de porosité intervient. Il est donc nécessaire pour un modélisateur d'affiner les paramètres hydrodispersifs, ainsi que de déterminer les erreurs du modèle. Cette vérification peut être réalisée par les valeurs de teneurs en chlorures, qui sont un traceur pertinent.

La simulation par rapport à la substance étudiée (nitrates, polluant) permet de déterminer les erreurs du modèle propres à la substance.

4.5.3.4.2. Description de la qualité de la simulation

En modélisation hydrogéologique, il est important de bien décrire la qualité de la simulation afin d'estimer la fiabilité des résultats. À cette fin, il est fait recours à :

- la reproduction de la dynamique hydrique ;
- la reproduction de la dynamique du traceur (chlorure) ;
- l'explication des différences de bilan entrée sortie par des phénomènes environnants comme *e.g.* l'épuration du complexe sol-plante.

Calage du modèle :

Le calage du modèle intervient en ajustant les paramètres hydrodynamiques des cellules. Des procédures de calage automatique existent dans de nombreux logiciels. Dans le cas d'une procédure de calage manuel, il est pertinent de calibrer les paramètres sur une partie représentative de la chronique de données piézométriques disponibles et de vérifier le calage en simulation sur la partie restante de la chronique.

- Calage hydrodynamique :

Le calage permet de s'assurer de la bonne reproduction des phénomènes par le modèle. Il est même possible de comparer deux simulations issues de modèles différents, comme présenté par le tableau 3.

Tableau 3 : Comparaison entre les sorties du Modflow® et Marthe®.

		Moyenne (m)	Ecart-type (m)	Ecart min (m)	Ecart max (m)	Nash (%)
Basses eaux	Modflow	Moy _{Mod.} 01	ET _{Mod.} 01	EM _{Mod.} 01	Em _{Mod.} 01	N _{Mod.} 01
	Marthe	Moy _{Mar.} 01	ET _{Mar.} 01	EM _{Mar.} 01	Em _{Mar.} 01	N _{Mar.} 01
Hautes eaux	Modflow	Moy _{Mod.} 02	ET _{Mod.} 02	EM _{Mod.} 02	Em _{Mod.} 02	N _{Mod.} 02
	Marthe	Moy _{Mar.} 02	ET _{Mar.} 02	EM _{Mar.} 02	Em _{Mar.} 02	N _{Mar.} 02
Cumul	Modflow	Moy _{Mod.} 03	ET _{Mod.} 03	EM _{Mod.} 03	Em _{Mod.} 03	N _{Mod.} 03
	Marthe	Moy _{Mar.} 03	ET _{Mar.} 03	EM _{Mar.} 03	Em _{Mar.} 03	N _{Mar.} 03

- **Distribution des perméabilités** est présentée par le tableau 4.

Tableau 4 : Comparaison entre la perméabilité obtenue par Modflow® et Marthe®.

		Moyenne (m)	Ecart-type (m)	Ecart min (m)	Ecart max (m)	Nash (%)
Perméabilité	Modflow	Moy _{Mod.} 01	ET _{Mod.} 01	EM _{Mod.} 01	Em _{Mod.} 01	N _{Mod.} 01
	Marthe	Moy _{Mar.} 01	ET _{Mar.} 01	EM _{Mar.} 01	Em _{Mar.} 01	N _{Mar.} 01

- **Bilan hydrologique** est présenté par le tableau 5.

Tableau 5 : Comparaison entre le bilan hydrologique obtenu par Modflow® et Marthe®.

		Moyenne (m)	Ecart-type (m)	Ecart min (m)	Ecart max (m)	Nash (%)
Bilan hydrologique	Modflow	Moy _{Mod.} 01	ET _{Mod.} 01	EM _{Mod.} 01	Em _{Mod.} 01	N _{Mod.} 01
	Marthe	Moy _{Mar.} 01	ET _{Mar.} 01	EM _{Mar.} 01	Em _{Mar.} 01	N _{Mar.} 01

- Estimation de la fiabilité des paramètres :

Il est important de décrire statistiquement les paramètres et de se rendre compte de leur interdépendance, à l'aide des outils suivants :

- matrice de covariance ;
- incertitudes associées ;
- matrice de sensibilité.

Distribution des coefficients de variations de K (perméabilité) et de h (hauteur piézométrique).

4.5.3.4.3. Exemple des sorties de simulation

- Préviation de l'exploitation d'un forage sur h en chaque maille ;
- Piézométrie observée/piézométrie calée ;
- Piézométrie calculée au temps t_1 pour une exploitation à débit Q.

4.5.3.4.4. Difficultés de la modélisation

Le modélisateur doit faire face à plusieurs difficultés bien identifiées :

- peu d'informations par rapport au degré d'hétérogénéité et de variabilité de la composition de l'aquifère ;
- compatibilité d'échelle de mesure du modèle ;
- faible sensibilité du modèle à certaines mesures ;
- sollicitations encore mal connues ;
- solutions non uniques ;
- critique de la modélisation.

En entrée :

- Signification des données ;
- Même incertitude sur tous les postes d'observation.

En sortie :

- Incertitude sur les débits.

4.6. Méthodes géochimiques et isotopiques

Plusieurs travaux récents ont révélé que les concentrations de solutés conservatifs tels que les chlorures peuvent être utilisés pour l'estimation de la recharge des nappes (Allison et Hughes, 1978; Edmunds et Walton, 1980; Edmunds *et al.*, 1988; Gaye et Edmunds, 1996).

Ainsi, les chlorures apportés par les eaux de pluies et les précipitations sèches dans la zone non saturée permettent de dresser un bilan et d'estimer le taux de recharge de la nappe superficielle.

Outre la possibilité de les utiliser pour l'estimation de la recharge et connaître les pertes d'eau par évaporation, les chlorures présentent aussi un intérêt pour l'étude des variations climatiques en zones arides et semi-arides. Dans les conditions favorables de l'écoulement par effet piston, les chlorures

et les isotopes stables de l'eau permettent en effet, par traçage naturel, de reconstituer des événements climatiques sur plus de 100 ans (Cook *et al.*, 1992).

Les études menées durant les deux dernières décennies ont montré que les méthodes usuelles d'estimation de la recharge des nappes n'ont pas été suffisamment précises, en particulier dans les régions semi-arides à arides caractérisées par un fort déficit pluviométrique, et que les recherches devraient être poursuivies sur l'utilisation conjointe des méthodes physiques, et des techniques géochimiques et isotopiques, pour évaluer la recharge des nappes (Ammary, 2007).

Ainsi, l'hydrologie isotopique employant les données géochimiques et isotopiques est devenue un moyen incontournable pour mieux comprendre le fonctionnement hydrologique des systèmes aquifères. Ces méthodes de traçage des eaux par les isotopes de l'environnement ont donné des résultats intéressants sous différents types de climat, en particulier en zones arides et semi-arides (Fontes et Olivry, 1976; Fontes et Edmunds, 1989), et se révèlent donc particulièrement utiles pour déterminer l'origine des eaux et leur mode de recharge.

Les traceurs isotopiques naturels permettent d'obtenir des informations concernant l'âge, l'origine des eaux, et leur vitesse d'écoulement. En effet, ces traceurs donnent en particulier accès à des indications sur l'origine et le temps de séjour des eaux de la nappe, *i.e.*, en termes de gestion, sur les sources d'alimentation du réservoir et sur le taux de renouvellement de l'eau dans ce réservoir. Dans les régions arides et semi-arides en particulier, ces techniques d'hydrologie isotopique permettent de pallier l'insuffisance de données topographiques et de contourner les conditions aux limites d'applicabilité de la loi de Darcy (Fontes et Olivry, 1976; Fontes et Edmunds, 1989).

Les insuffisances liées à l'application de ces méthodes ont justifié le développement des techniques de traçage avec les isotopes du milieu et certains ions conservés comme les chlorures. Ces techniques ont donné des résultats intéressants sous différents types de climat, et en particulier en zones arides et semi arides. De nombreux travaux (Allison *et al.*, 1983; Allison, 1988) ont prouvé l'utilité de l'exploitation des techniques de traçage de l'eau. Ces auteurs préconisaient l'utilisation conjointe et efficace des approches physiques et des méthodes géochimiques et isotopiques.

5. CONCLUSION

Après avoir survolé les méthodes utilisées pour l'estimation et la mesure de la recharge dans différents climats, il devient évident que les méthodes mécanistes utilisées principalement pour les zones à climats humides ne sont guère transposables aux climats arides et semi-arides surtout en cas de grande superficie. Cette thèse propose l'utilisation d'une méthode directe hydrochimique : le bilan des chlorures par l'utilisation de la relation développée par Eriksson et Khunakasem (1969) estimant la recharge ponctuellement. Cette méthode a été ensuite développée par l'auteur de cette thèse en lui offrant la solution pour la spatialiser sur quelques centaines de km² (Ait El Mekki *et al.*, 2015) du piémont du Haouz Central. Mais, l'épine dorsale de cette thèse reste le développement d'un nouveau modèle empirique estimant indirectement la recharge potentielle sur des milliers de km² en utilisant le SIG et les techniques de télédétection pour combiner les différents paramètres régissant la recharge (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b). Ce modèle a été évalué et par la suite validé (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016a).

**CHAPITRE 3. CONCEPTION D'UN NOUVEAU
MODÈLE EMPIRIQUE ESTIMANT LA RECHARGE
POTENTIELLE DES AQUIFÈRES DANS LES ZONES
ARIDES À SEMI-ARIDES À L'AIDE DU SIG
ET DE LA TÉLÉDETECTION.
CAS DE LA PLAINE DU HAOUZ,
MARRAKECH MAROC**

RÉSUMÉ

Les zones arides à semi-arides sont caractérisées par une faible ressource hydrique superficielle et des précipitations insuffisantes généralement au-dessous de 350 mm. C'est la raison pour laquelle l'exploitation des eaux souterraines est nécessaire pour satisfaire les besoins. La pérennité de cette ressource, sollicitée par la demande urbaine, agricole, industrielle et touristique, requiert une gestion rigoureuse. La notion de taux de recharge des aquifères est particulièrement utile dans toute quantification de la ressource et sa gestion durable : elle sert de base à un système d'aide à la décision pour d'éventuels projets futurs. Cette étude contribue à la détermination de la recharge potentielle des aquifères selon une analyse multicritère qui englobe les facteurs majeurs et mineurs déterminant l'infiltration. Ce travail repose sur l'utilisation d'un Système d'Information Géographique, appuyé par des techniques de télédétection, pour concevoir des couches de données thématiques. Ces dernières décrivent la variation spatiale des différents facteurs régissant la recharge, les intégrant et les analysant pour en déduire la recharge potentielle spatialisée de l'aquifère. Cette approche a permis de classer la plaine du Haouz (Maroc) en trois niveaux descriptifs quant au taux de recharge avec un intervalle de valeurs allant de 3,5 à 19 %.

Mots clés : Recharge potentielle des aquifères ; Modèle empirique ; Nappe libre ; Analyse multicritère ; Système d'Information Géographique ; Télédétection ; Plaine du Haouz (Maroc).

1. INTRODUCTION

Dans les zones arides à semi-arides, les précipitations interannuelles moyennes peuvent atteindre jusqu'à 350 mm et varient de 50 à 100 %. Bien que ces zones puissent être utilisées comme pâturage, l'agriculture pluviale n'est généralement pas envisageable. Cela peut être comparé à des zones semi-arides ou subhumides, où les précipitations interannuelles moyennes peuvent aller jusqu'à 700 mm et varient de 20 à 50 %. Le pâturage est satisfaisant dans ces zones, bien que les récoltes aient tendance à être irrégulières. Les deux types de zones souffrent de la sécheresse périodique et sont couverts par divers types de végétations et de sols (Goodin et Northington, 1985).

Dans les zones arides à semi-arides caractérisées par une température comprise entre 5 et 45 °C, les eaux souterraines constituent la seule ressource hydrique dont le renouvellement est très limité. En outre, le développement économique, industriel ou agricole a contribué à détériorer cette ressource indispensable. La plaine du Haouz relève de cette situation : elle a servi à l'implantation de nouvelles zones industrielles et urbaines de plus en plus importantes accompagnée d'une grande extension des périmètres agricoles irrigués. L'approvisionnement en eau a soumis la ressource souterraine à une terrible dégradation, quantitative tant que qualitative : les niveaux piézométriques subissent des fluctuations instables qui renforcent l'amplitude de cette dégradation (Xu et Usher, 2006; Ait El Mekki, 2010; Margat et Gun, 2013). La quantification des ressources est indispensable à une gestion optimale et durable des aquifères : les hydrologues nécessitent une information précise sur les conditions de réalimentation et d'exploitation au niveau de chaque bassin.

La nappe Mio-Plio-Quaternaire de la plaine du Haouz, qui fournit plus de 400 millions de m³ d'eau, est utilisée pour irriguer une superficie supérieure à 200 000 ha. Au cours des années de sécheresse, le volume d'eau nécessaire pour l'irrigation est estimé à > 1 300 millions m³/an. (Abourida, 2007; Ait El Mekki *et al.*, 2015).

Les Systèmes d'Information Géographique et la télédétection sont devenus un outil indispensable pour la gestion de diverses ressources naturelles (Helldén, 1987; Belward et Valenzuela, 1991; Welch *et al.*, 1992; Saraf et Choudhury, 1998; Solomon et Quiel, 2006; Jha et Chowdary, 2007; Münch et Conrad, 2007; Dar *et al.*, 2011; Magesh *et al.*, 2011a; Magesh *et al.*, 2011b; Kumar *et al.*, 2012). La télédétection ne fournit pas seulement une échelle étendue de la distribution spatio-temporelle des observations, elle permet aussi de gagner du temps tout en réduisant la facture énergétique (Murthy, 2000; Gad, 2002; Leblanc *et al.*, 2003; Tweed *et al.*, 2007). Cette technique permet de gérer globalement ou régionalement l'environnement (Bannari *et al.*, 2004) et de caractériser la surface terrestre, *e.g.* les fracturations structurales, l'occupation du sol, le couvert végétal, la lithologie, etc. La combinaison du SIG et la télédétection est un outil efficace pour collecter l'information sur la recharge potentielle des eaux souterraines, en utilisant aussi des cartes classiques, des données

satellitaires et celles obtenues sur le terrain notamment dans les régions arides à semi-arides similaires à notre zone d'étude (Krishnamurthy *et al.*, 1996; Tiwari et Rai, 1996; Das *et al.*, 1997; Thomas *et al.*, 1999; Harinarayanan *et al.*, 2000; Muralidhar *et al.*, 2000; Leblanc *et al.*, 2003; Servat *et al.*, 2003; Sener *et al.*, 2005; Shaban *et al.*, 2006; Leblanc *et al.*, 2007; Chowdhury *et al.*, 2010; Machiwal *et al.*, 2011; Magesh *et al.*, 2012; Mukherjee *et al.*, 2012; Khodaei et Nassery, 2013). La plupart des spécialistes utilisent cette combinaison, mais, selon les travaux, les paramètres identifiés comme agissant sur le potentiel de la recharge sont différents, ce qui implique des résultats divergents ; *e.g.* alors que Teeuw (1995) a utilisé seulement les linéaments structuraux, d'autres auteurs ont ajouté des facteurs tels que la géologie, la pente, la densité de drainage, la géomorphologie, l'occupation du sol, la pédologie et l'intensité des précipitations (Sander *et al.*, 1996; Das, 2000; Sener *et al.*, 2005; Shaban *et al.*, 2006; Ganapuram *et al.*, 2009; Al Saud, 2010). En général, les résultats obtenus par ces techniques sont satisfaisants et validés par des enquêtes de terrain (Magesh *et al.*, 2012; Ait El Mekki et Laftouhi, 2016a).

Le présent chapitre, entrepris pour définir les zones de recharge et en évaluer le potentiel, est basé sur la création d'un SIG optimisé intégré avec la télédétection. Ce couplage permet d'effectuer une analyse multicritère spatialisée reposant sur le choix des paramètres régissant l'infiltration directe des précipitations, leur degré d'influence et leurs relations éventuelles. Chaque paramètre est d'abord étudié indépendamment puis tous les facteurs sont intégrés et compilés pour déduire une carte synthétique de la recharge potentielle.

La lithologie, l'occupation du sol et le couvert végétal, la densité de drainage, la pente, la pédologie, les linéaments et les précipitations sont les sept facteurs influençant la recharge des aquifères (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016a; Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b). L'écoulement des eaux de la surface vers les profondeurs résulte de la perméabilité, de la compaction et de la nature du ciment qui lie les grains, donc du caractère lithologique ainsi que de la densité de fracturation (Kouadio *et al.*, 2008).

Le ralentissement des ruissellements superficiels par le couvert végétal favorise l'infiltration de l'eau. En outre, le développement des systèmes racinaires améliore la perméabilité du sol. Enfin, le feuillage protège le sol de l'impact de la pluie et diminue le phénomène de battance (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b).

L'objectif principal de ce chapitre était de concevoir un modèle empirique pour déterminer le taux de recharge potentielle dans un aquifère à l'aide d'une analyse multicritère qui comprenait plusieurs facteurs (majeurs et mineurs) qui influent sur le taux d'infiltration de l'eau dans l'aquifère. L'objectif à long terme est d'utiliser ce modèle comme outil d'aide à la décision dans la planification des futurs projets de recharge artificielle (Ait El Mekki *et al.*, 2015; Ait El Mekki et Laftouhi, 2016a; Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b).

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Zone d'étude

La plaine du Haouz est située à 7°2'W et 9°1'W, 31°5'N et 32°0'N, entre le Haut Atlas au sud et le petit massif des Jbilet au nord (Fig. 11). Elle couvre 6 200 km² et sa largeur moyenne est de l'ordre de 40 km N-S tandis que sa longueur moyenne est de 150 km E-W. Elle comprend la grande ville de Marrakech (31°35'00.0"N et 8°00'0.0"W). La plaine est un synclinal formé d'alluvions quaternaires, accidentée de quelques appointements de roches anciennes (Piqué *et al.*, 2007; Bertrand *et al.*, 2013). Le relief de la zone varie entre 188 et 1453 m au-dessus du niveau moyen de la mer. Elle est drainée par Oued Tensift et ses affluents venus du Haut Atlas (Oued Lakhdar, Tessaout, R'dat, Zat, Ourika, Rheraya, N'Fis, Assif El mal, Seksaoua, Imin'Tanout). La majorité de ce réseau hydrographique est à sec, sauf pendant la fonte de neiges ou à la suite de pluies exceptionnelles. La plaine est fortement marquée par l'aridité, le relevé météorologique de Marrakech (Z = 460 m) révélant une variation de température de 5 à 45 °C et la station pluviométrique de Marrakech (Z = 460 m) enregistrant 232,86 mm comme moyenne sur une période de 45 ans (1967–2012) (ABHT : Agence du Bassin Hydraulique du Tensift, Marrakech, Maroc).

La profondeur de l'eau par rapport au sol varie entre 4 m près des Oueds et peut atteindre jusqu'à 80 m loin des cours d'eau. La nappe phréatique est une importante nappe généralisée constituée par des alluvions Mio-Plio-Quaternaire sous forme de dépôts détritiques issus du démantèlement de la chaîne atlasique par les différents Oueds (Sinan, 2000). Elle est alimentée par l'infiltration des eaux des Oueds, les précipitations et le retour des eaux d'irrigation.

2.2. Méthodologie

La méthodologie est schématisée dans la Fig. 12. Elle consiste à croiser l'information spatiale des sept facteurs régissant la recharge des aquifères, à savoir la lithologie, la pente, la densité de drainage, la densité des linéaments, l'occupation du sol et le couvert végétal, la pédologie et l'intensité des précipitations (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b).

2.2.1. Lithologie

La lithologie a été déterminée par digitalisation de toutes les formations lithologiques à partir de la carte géologique numérisée de Marrakech (1 :500 000) (Service Géologique du Maroc, 1957) et de la carte numérisée des roches mères du Haouz (Dauteloup, 1958a) tout en considérant les données géologiques du Haouz obtenues par plusieurs auteurs (Moret, 1931; Michard, 1976; Biron, 1982; Moukhchane, 1983; Salomon *et al.*, 1996; Sinan, 2000; Piqué *et al.*, 2007).

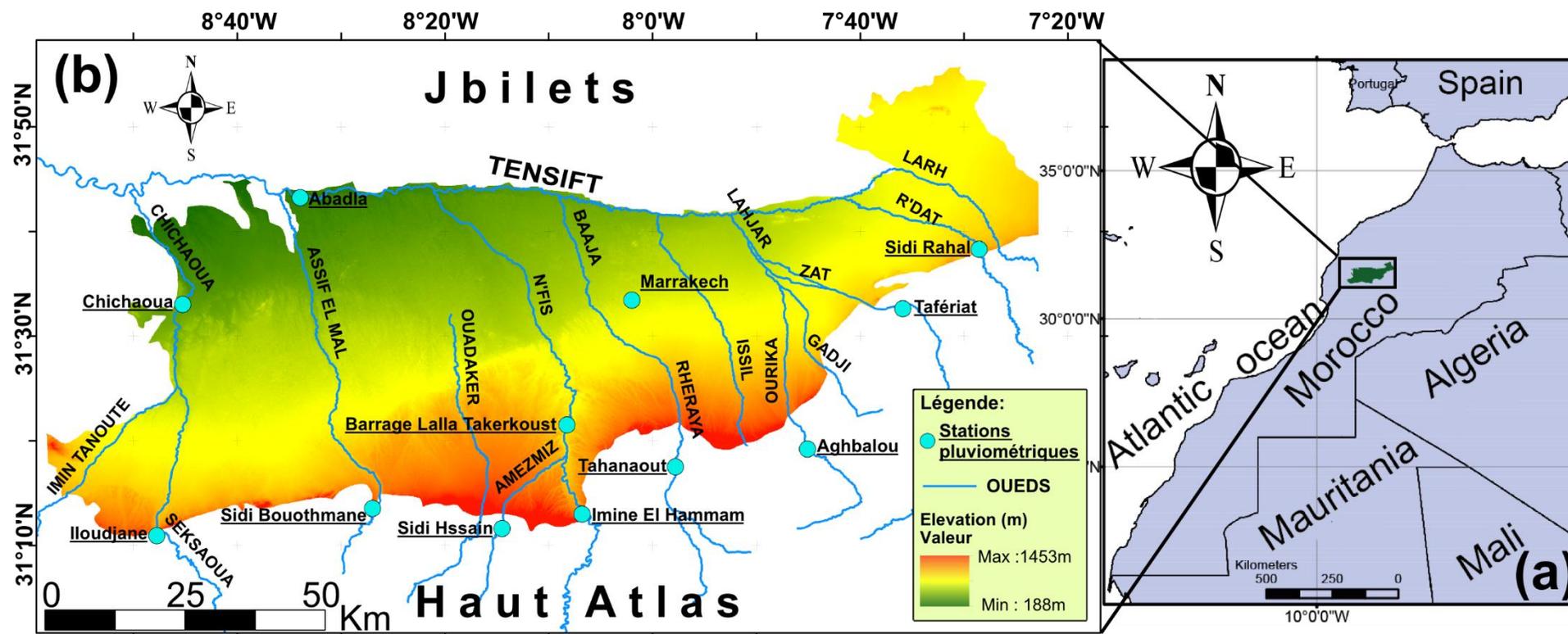


Figure 11 : Situation géographique de la zone d'étude.

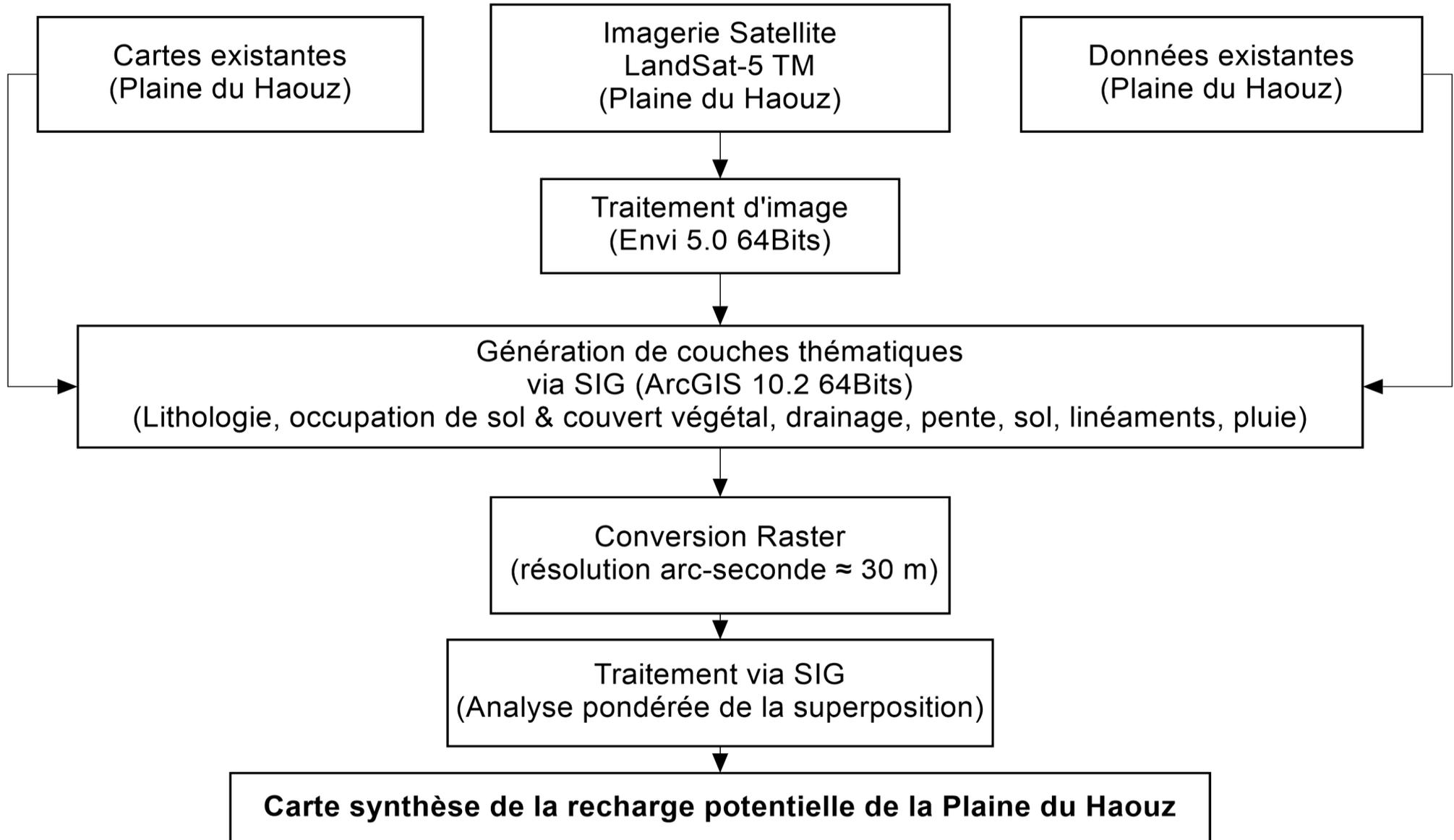


Figure 12 : Méthodologie adoptée pour la conception du modèle empirique pour l'évaluation du potentiel de recharge (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b).

2.2.2. Densité de drainage

Le réseau hydrographique a été figuré par le module Arc Hydro Tools® 2.0 sous ArcMap® 10.2 suivant un protocole comprenant 10 étapes (ESRI, 2005; Ait El Mekki, 2010; Venkatesh, 2012). La donnée d'entrée est un *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model* (ASTER GDEM for water) obtenu de Japan Space Systems (2011) avec une résolution d'un arc-second ≈ 30 m (version 2 (October 17, 2011)). La densité de drainage (D_d) a été calculée à partir de l'Équation 4 (Horton, 1932; Horton, 1945; MaDGIC, 2012) en utilisant le réseau hydrographique prédéfini.

$$\text{Équation 4} \quad D_d \text{ (km}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Longueur totale du réseau hydrographique (km)}}{\text{Superficie du bassin (km}^2\text{)}}$$

2.2.3. Pente

La carte des pentes a été créée à partir d'ASTER GDEM (Japan Space Systems, 2011) avec le module Spatial Analyst (Slope) d'ArcMap® 10.2.

2.2.4. Linéaments

Les linéaments correspondent aux zones de failles et fractures entraînant une augmentation de la porosité secondaire et de la perméabilité. Ce facteur est très important sur le plan hydrogéologique, car il constitue un cheminement vers l'aquifère. La présence de fractures implique habituellement une zone perméable. Une zone à forte densité de linéaments est susceptible de favoriser l'infiltration des eaux (Haridas *et al.*, 1998). Les linéaments sont digitalisés à partir de la carte structurale numérisée du Maroc (Direction de Géologie, 1982) et de la carte géologique numérisée de Marrakech (Service Géologique du Maroc, 1957). Les polygones obtenues sont traitées avec le module Spatial Analyst (Density \ Line Density) d'ArcMap® 10.2 pour dresser la carte de la densité des linéaments (L_d) en utilisant l'Équation 5 (Shaban *et al.*, 2006; MaDGIC, 2012).

$$\text{Équation 5} \quad L_d \text{ (km}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Longueur totale des linéaments (km)}}{\text{Superficie du bassin (km}^2\text{)}}$$

2.2.5. Sols

Les caractéristiques de la matrice du sol influencent les forces de capillarité et d'adsorption dont résultent les forces de succion, qui elles-mêmes, régissent en partie l'infiltration (Musy et Soutter, 1991). Le sol a été introduit par digitalisation des cartes pédologiques de l'ensemble du Haouz (Dauteloup, 1958a; Dauteloup, 1958b; Dauteloup, 1958c; Dauteloup, 1958d; Dauteloup, 1959; Mahler, 1960a; Mahler, 1960b; Mahler, 1960c; Mahler, 1960d; Le Rouget, 1973a; Le Rouget, 1973b; Le Rouget, 1975) et en intégrant d'autres données bibliographiques (Concaret, 1960; Badraoui, 2006; INRA du Maroc *et al.*, 2009).

2.2.6. Précipitations

La carte des précipitations a été préparée en utilisant les données ponctuelles, sur une période de 45 ans (ABHT), recueillies par 12 stations pluviométriques de la région. Il s'agit de : Marrakech, Tahanaout, Agbalou, Sidi Rahal, Tafériat, Imine El Hammam, Barrage Lalla Takerkoust, Sidi Hssain, Sidi Bouothmane, Chichaoua et Abadla (Fig. 11). Ces données, interpolées par l'inverse de la distance pondérée (IDW) (Philip et Watson, 1982; Watson et Philip, 1985; Childs, 2004; Yang *et al.*, 2007), ont donné lieu à la carte des précipitations à 30 m de résolution.

2.2.7. Occupation du sol et couvert végétal

Pour déterminer l'occupation du sol et le couvert végétal de la zone par télédétection, une série de prétraitements a été appliquée sur l'image satellite Landsat-5 TM+ (NASA). Ces prétraitements concernent les effets atmosphériques, les opérations d'étalonnage radiométrique des capteurs et les distorsions géométriques et topographiques (Jensen et Lulla, 1987). Après correction de l'image, la classification supervisée a été établie par la méthode de Maximum Likelihood Classification (MLC) (Maselli *et al.*, 1992; Patil *et al.*, 2012). La MLC est l'une des méthodes les plus populaires de classification supervisée utilisées pour les images satellitaires. Elle est basée sur la probabilité qu'un pixel appartienne à une classe particulière. Le logiciel Envi® 5.0 a été le support ayant servi à définir toutes les classes occupant le sol, y compris : le sol nu, les cultures annuelles, les forêts, les arbres, les barrages, bassins d'eau, des affleurements rocheux et les aménagements urbains. Le résultat a été intégré dans l'environnement du SIG sous format Raster avec une résolution de 30 m.

Chaque paramètre régissant la recharge a été traité séparément. Après la construction des cartes de ces facteurs, une classification est effectuée pour chacun d'eux et une côte affectée à chaque classe selon son intensité allant de 1 à 10. Une carte thématique des côtes a été alors établie, pour chaque paramètre, sous format Raster avec une résolution de 30 m (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b).

Le SIG est élaboré sous ArcGIS® 10.2 avec une carte qui délimite la zone d'étude et localise ses stations pluviométriques.

2.3. Facteurs influençant le potentiel de la recharge de la nappe

Lithologie, occupation du sol et couvert végétal, densité de drainage, pente, sol, linéaments et précipitations sont les sept facteurs influençant la recharge. Leur relation multilatérale est illustrée dans la Fig. 13 (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b).

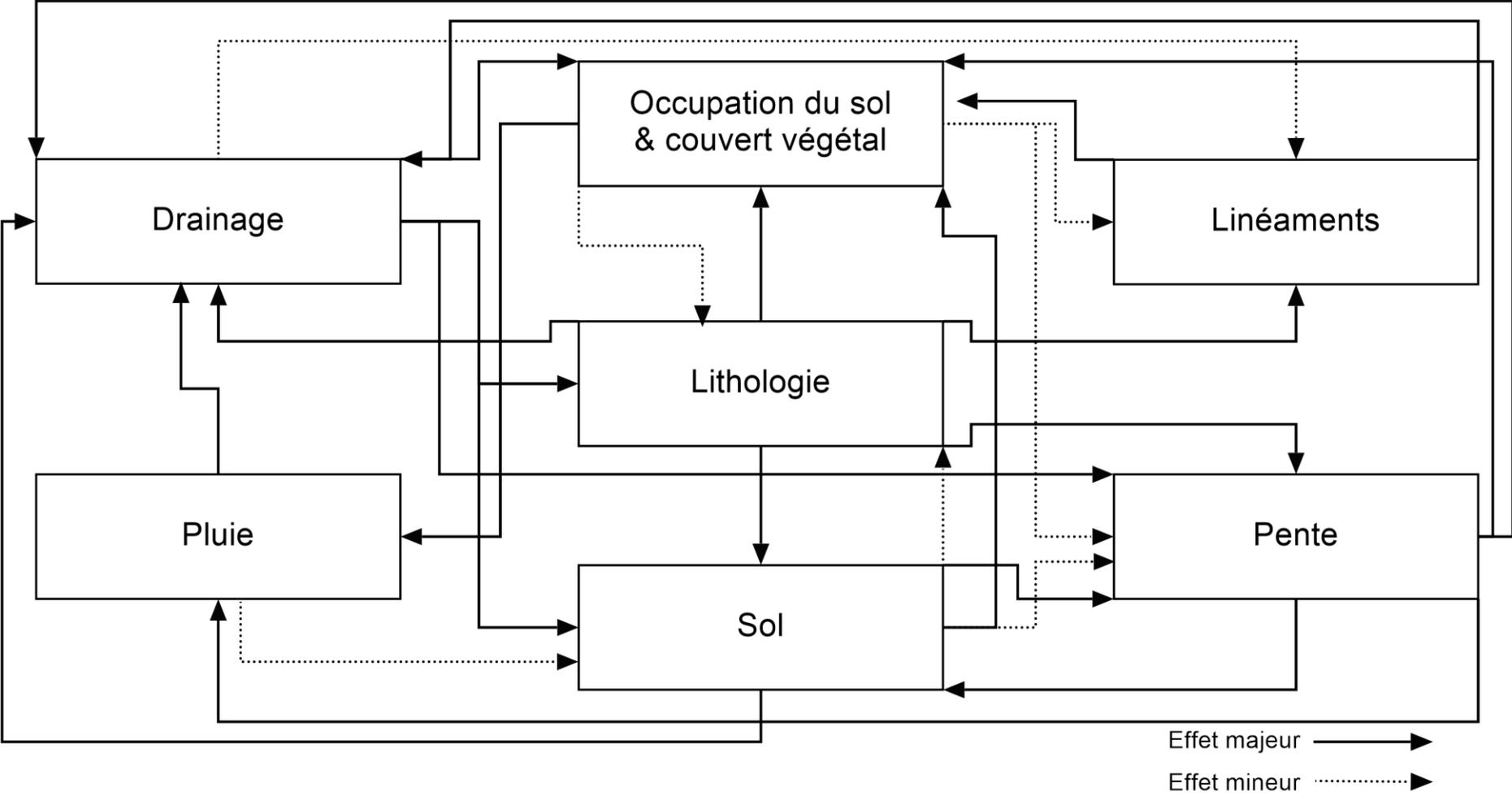


Figure 13 : Relation multilatérale entre les sept facteurs régissant la recharge de l’aquifère du Haouz (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b).

L'indice d'infiltration (I_i) résulte de la pondération, l'évaluation et l'expression du rôle de chaque paramètre ainsi que de sa participation à l'infiltration. Cet indice a une valeur égale à la somme des différentes côtes d'un paramètre multiplié par le poids correspondant (Équation 6) (Armbruster, 1976).

$$\text{Équation 6} \quad I_i = \sum_{i=1}^n C_i \times W_i$$

Où :

- I_i : indice d'infiltration ;
- W_i : poids du paramètre ;
- C_i : côte du paramètre allant de 1 à 10.

La détermination des poids repose sur l'analyse des effets inter-paramètres : un point (1 pt) est attribué pour chaque effet majeur, et un demi-point (0,5 pt) pour chaque effet mineur (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b). Le poids de chaque facteur était alors égal à la somme des effets qu'il exerce sur les autres (Équation 7) (Magesh *et al.*, 2012).

$$\text{Équation 7} \quad W_i = E_M + E_m$$

Où :

- W_i : poids du paramètre ;
- E_M : effet majeur ;
- E_m : effet mineur.

Le taux de contribution (Tx_i) dans la recharge potentielle de chaque paramètre est égal à la proportion de son indice d'infiltration sur la somme des indices de tous les paramètres (Équation 8) (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b).

$$\text{Équation 8} \quad Tx_i = \frac{I_i}{\sum I_i} \times 100$$

Où :

- Tx_i : taux de contribution du paramètre i ;
- I_i : indice d'infiltration du paramètre i .

Le potentiel de recharge d'un pixel donné correspond à la somme des indices d'infiltration de tous les paramètres pris en compte. La sommation de toutes les cartes thématiques des côtes des différents paramètres ainsi que la multiplication de chacune de ces cartes par le taux de contribution de chaque

facteur a été réalisée avec le SIG, en s'appuyant sur le module Spatial Analyst Tools (Map Algebra \ Raster Calculator) d'ArcMap® du logiciel ArcGIS® 10.2 pour enfin tracer une carte synthétique délimitant les zones de recharge potentielle (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b).

2.4. Formule d'estimation du potentiel de la recharge de la nappe

La carte de recharge potentielle a été obtenue par compilation et intégration des cartes thématiques des différents paramètres (Fig. 14). Cette carte synthèse résulte de la sommation de toutes les cartes thématiques des côtes des différents facteurs multipliées par le poids de chaque facteur et par son taux de contribution (Équation 9) développée dans le cadre de ce travail (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b).

$$\text{Équation 9} \quad M_p R = \sum M_p F_i \times W_i \times T x_i$$

Où :

- $M_p R$: carte de la recharge potentielle de la nappe ;
- $M_p F_i$: carte du paramètre i en fonction de sa côte ;
- W_i : poids du paramètre i ;
- $T x_i$: taux de contribution du paramètre i .

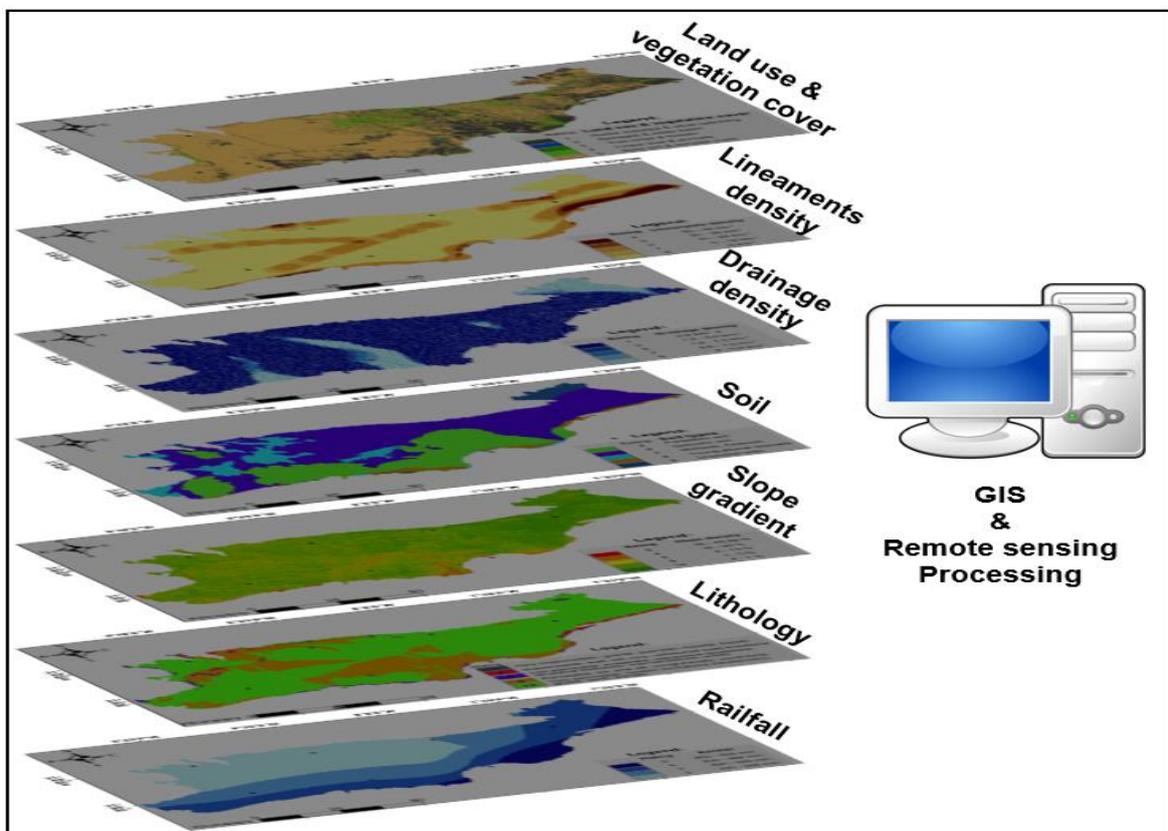


Figure 14 : Compilation et intégration des cartes thématiques des différents paramètres.

3. RÉSULTATS

Les facteurs régissant la recharge ont été étudiés séparément les uns des autres, puis intégrés et compilés dans le SIG pour déduire la carte synthèse de la recharge potentielle.

3.1. Calcul de la valeur de chaque paramètre

3.1.1. Lithologie

La lithologie est un facteur direct : la perméabilité des roches régit directement l'infiltration. Les données géologiques du Haouz extraites de plusieurs sources sont consignées dans le tableau 6 et le résultat de la digitalisation des données spatialisées a fourni la carte de la lithologie (Fig. 15).

Tableau 6 : Principaux faciès constituant la plaine du Haouz.

Échelle temps	Type de faciès
Quaternaire	Graviers, galets, sable, limon, calcaire lacustre et marne.
Plio-Villafranchien	Conglomérats à ciment gréseux.
Mio-Pliocène	Conglomérats, marne gréseuse et limon rose.
Crétacé-Éocène	Calcaire gréseux, calcaire dolomitique, marne et évaporites.
Jurassique supérieur	Calcaire gréseux.
Lias inférieur et moyen	Calcaire dolomitique et marne.
Permo-Trias	Silt, argile, grès et basalte.
Primaire	Schistes, quartzites, rhyolites, grès et calcaire.

3.1.2. Occupation du sol et couvert végétal

L'occupation du sol est un facteur direct. Le résultat de la classification supervisée sur l'image satellite LandSat-5 TM effectuée est consigné Fig. 16. Cette carte se penche sur la définition des périmètres contenant les sols nus, les cultures annuelles, les arboricultures, les forêts, les affleurements rocheux, les aménagements urbains et les constructions anthropiques.

3.1.3. Densité de drainage

Un réseau hydrographique complexe et bien développé induit une infiltration très faible *i.e.* qu'il est un facteur inverse. Les valeurs de cette densité sont comprises entre 0 et 13,5 km⁻¹. Elle a été regroupée en 5 classes (tableau 7 et Fig. 17).

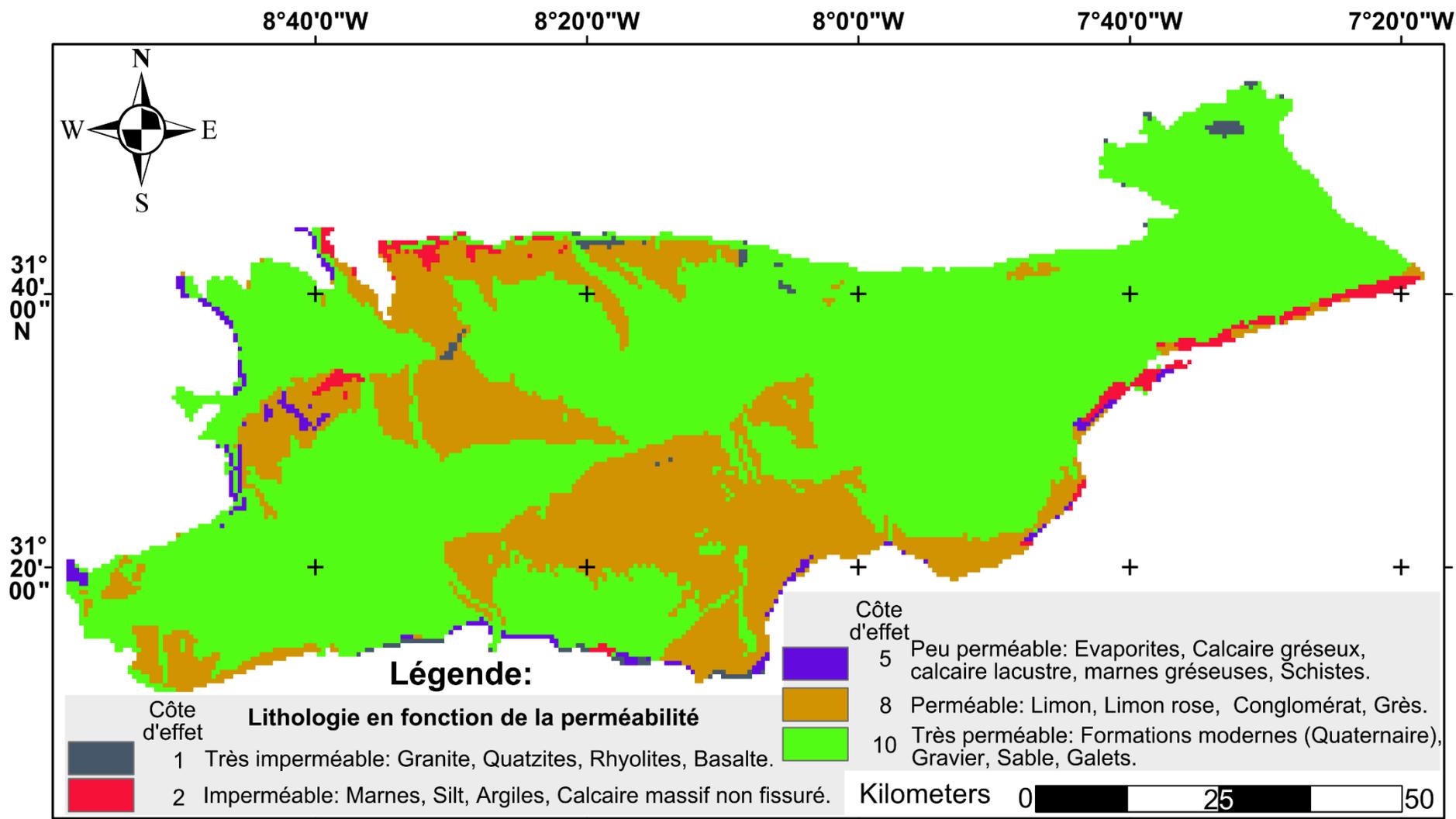


Figure 15 : Lithologie du Haouz.

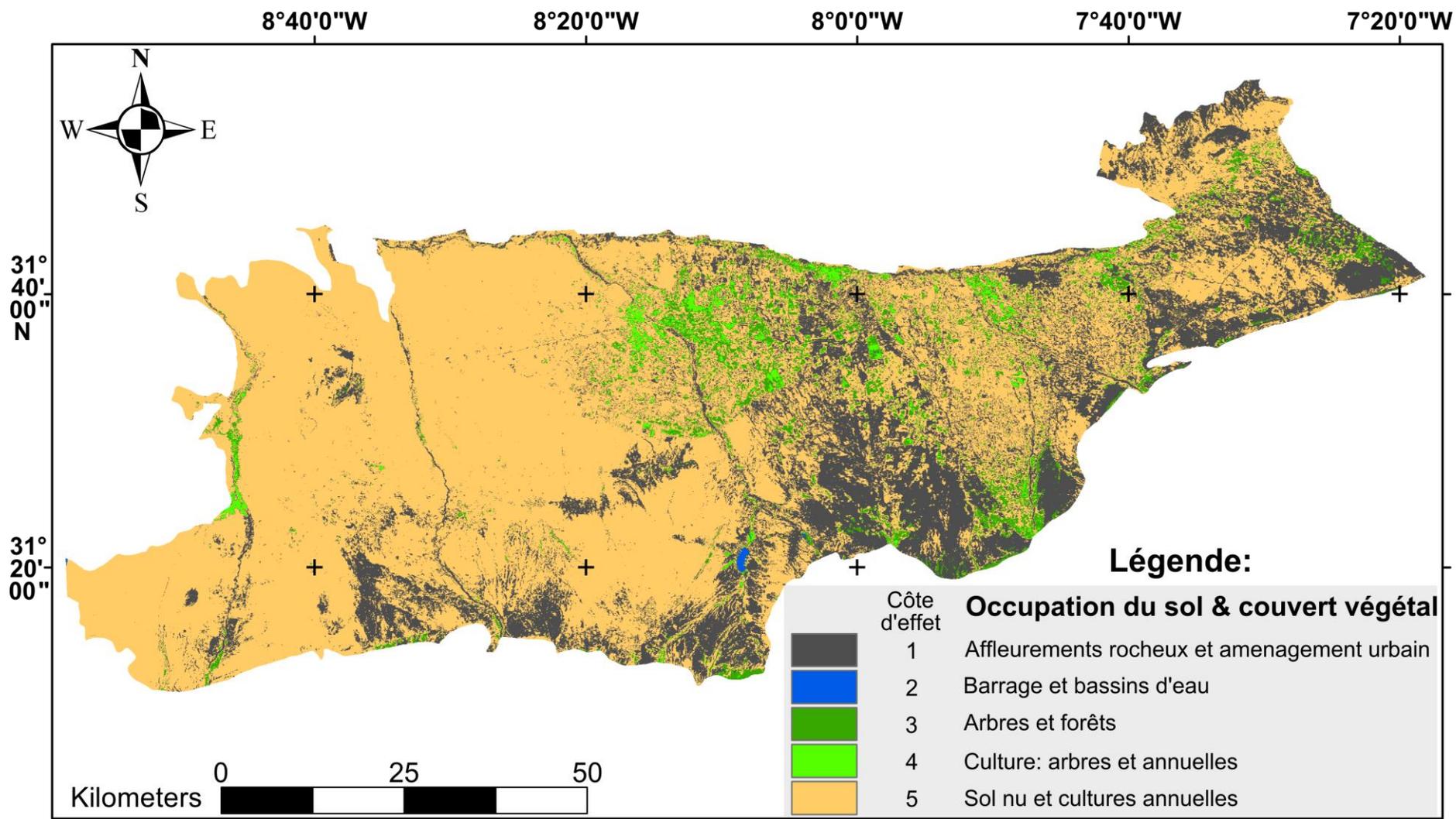


Figure 16 : Occupation du sol et couvert végétal du Haouz.

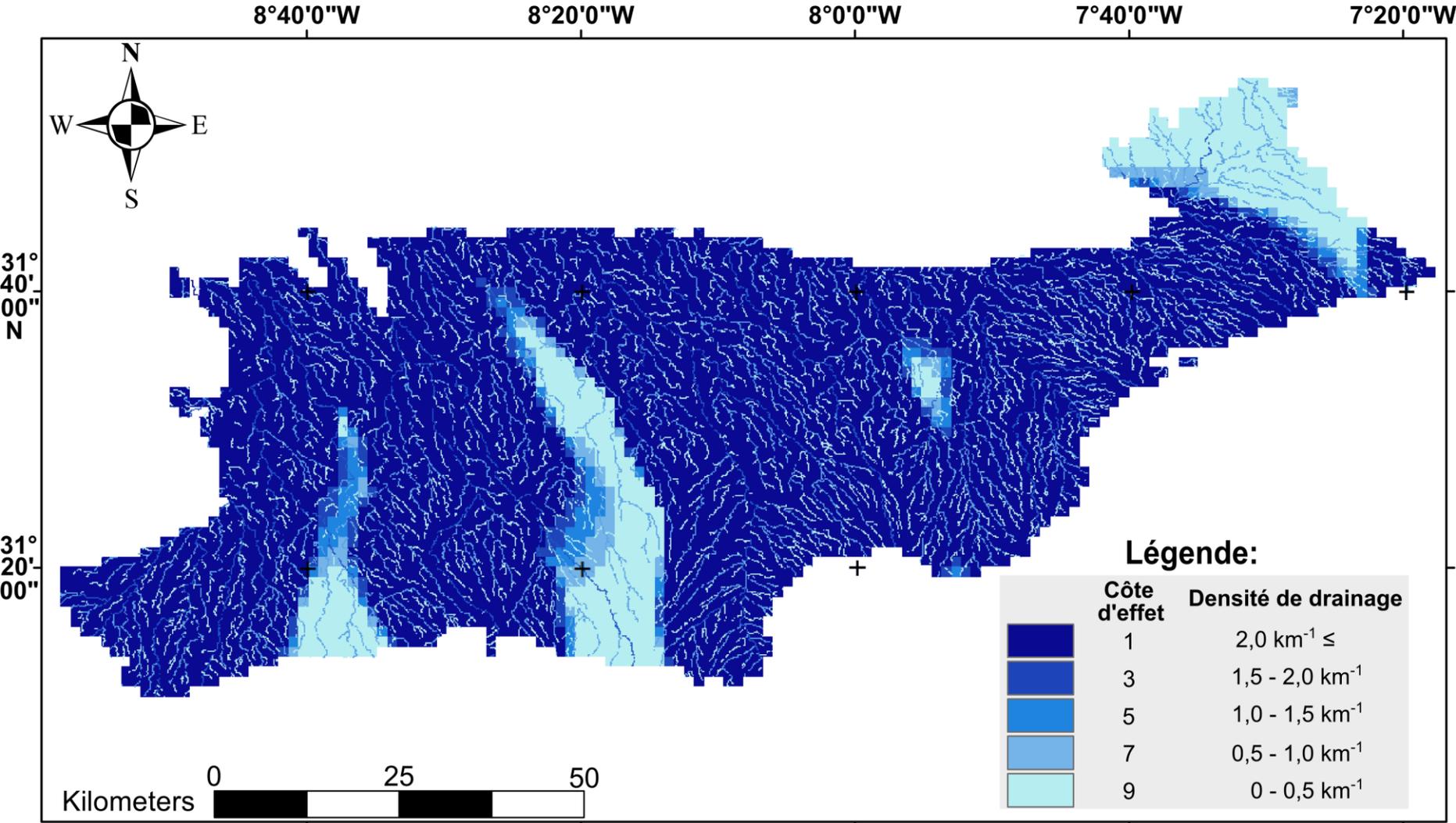


Figure 17 : Densité de drainage du Haouz.

Tableau 7 : Classes de la densité de drainage de la plaine du Haouz.

Densité de drainage (km ⁻¹)	Intensité	Zones
ID ≥ 2,0	Très forte	Zone montagneuse
2,0 – 1,5	Forte à moyenne	Piémont et reliefs de faibles altitudes
1,5 – 1,0	Moyenne à faible	Plaine à pente moyenne
1,0 – 0,5	Faible	Plaine à faible pente
0,5 – 0,0	Très faible	Plaine à très faible pente ou dépression

3.1.4. Pente

Une pente élevée génère un écoulement rapide qui augmente le taux d'érosion et fournit un potentiel de recharge faible ; elle est donc un facteur inverse (Magesh *et al.*, 2011a; Magesh *et al.*, 2011b). La Fig. 18 correspond à la cartographie de pente avec un zoning allant de 0 à 45,9 %.

3.1.5. Sol

La granulométrie du sol est un facteur direct important pour la définition du potentiel de recharge des aquifères. À partir de l'étude des données pédologiques et des cartes de sol de la région, l'analyse a mis en évidence les types de sol illustrés dans le tableau 8 et la Fig. 19.

Tableau 8 : Classes et types des sols de la plaine du Haouz.

Classes des sols déterminés	Type des sols
Sols d'érosion schisteux	Sols peu évolués d'érosion
Sols châtaîns sur glacis	Sols peu évolués d'érosion
Sols châtaîns	Sols Isohumiques
Sols isohumiques bruns	Sols Isohumiques
Sols fersiallitiques	Fersiallitiques
Sols sur formation synclinale	Sols peu évolués d'apport alluvial
Sierozems	Sols Isohumiques
Sols avec encroûtement calcaire	Sols calcomagnésimorphe
Sols sur plateau calcaire	Sols calcomagnésimorphe
Rendzines brunifiées	Sols calcomagnésimorphe
Sols de piémont sur formation tertiaire	Sols peu évolués d'apport alluvial
Sols sur plateau calcaire	Sols calcomagnésimorphe

3.1.6. Densité des linéaments

Les linéaments correspondent aux zones de failles et fractures entraînant une augmentation de la porosité secondaire et de la perméabilité. Ce facteur est très important sur le plan hydrogéologique, car il constitue un cheminement vers l'aquifère. La présence de fractures implique habituellement une zone potentiellement perméable. Une zone à forte densité de linéaments est susceptible de favoriser l'infiltration des eaux (Haridas *et al.*, 1998) ; c'est donc un facteur direct. La carte de la densité des linéaments est représentée sur la Fig. 20 avec des valeurs comprises entre 0 et 36,8 km⁻¹.

3.1.7. Précipitations

L'observation des données des 12 stations pluviométriques de la région sur une période de 45 ans révèle une moyenne générale de l'ordre 313 mm/an. La moyenne de la station la plus basse est 174 mm/an ; il s'agit d'Abadla. Par contre la moyenne de la station la plus élevée 470 mm/an, il s'agit d'Aghbalou. Une interpolation spatialisée par l'inverse de la distance pondérée (IDW) a donné la carte présentée par la Fig. 21.

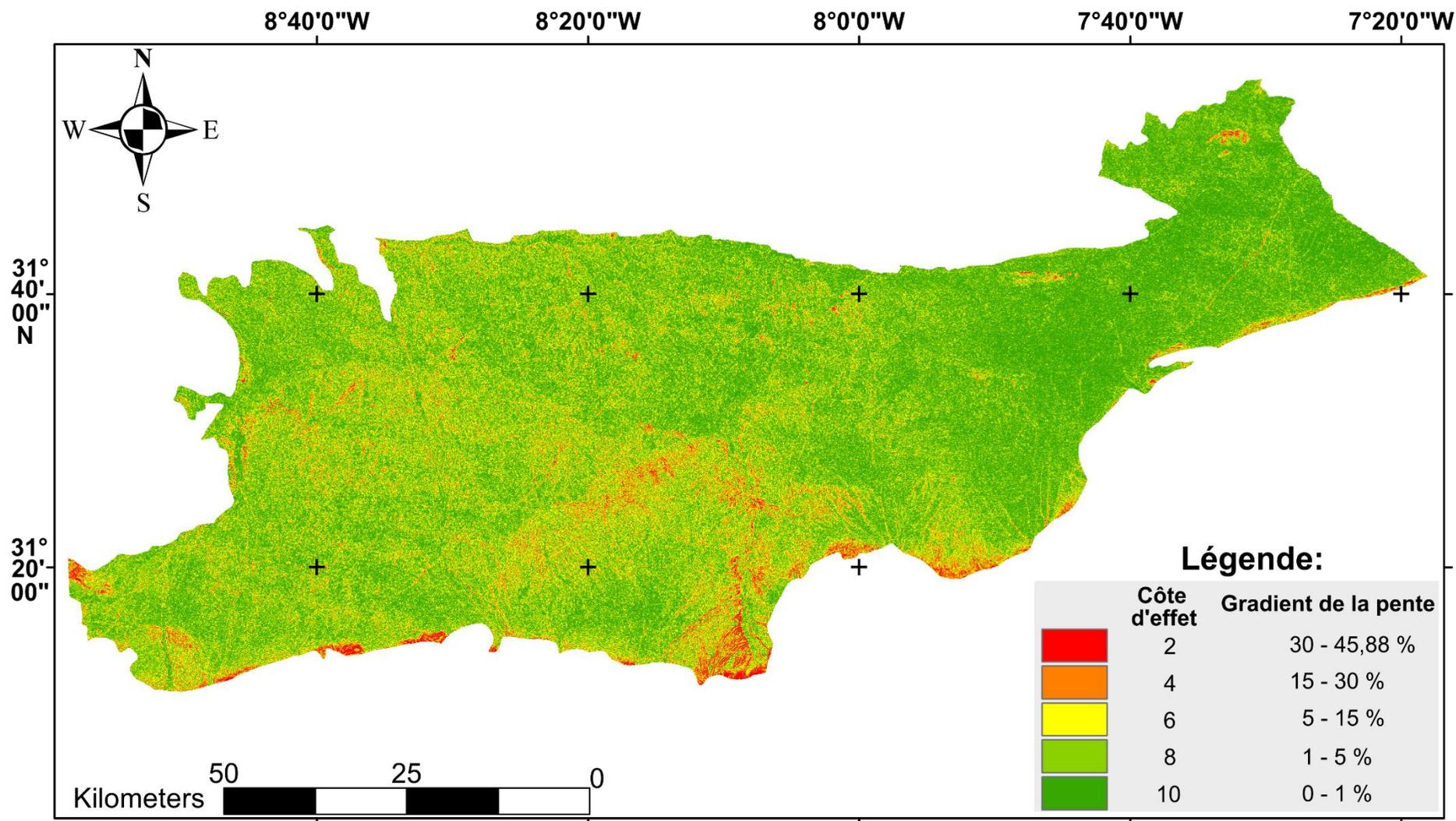


Figure 18 : Pente du Haouz.

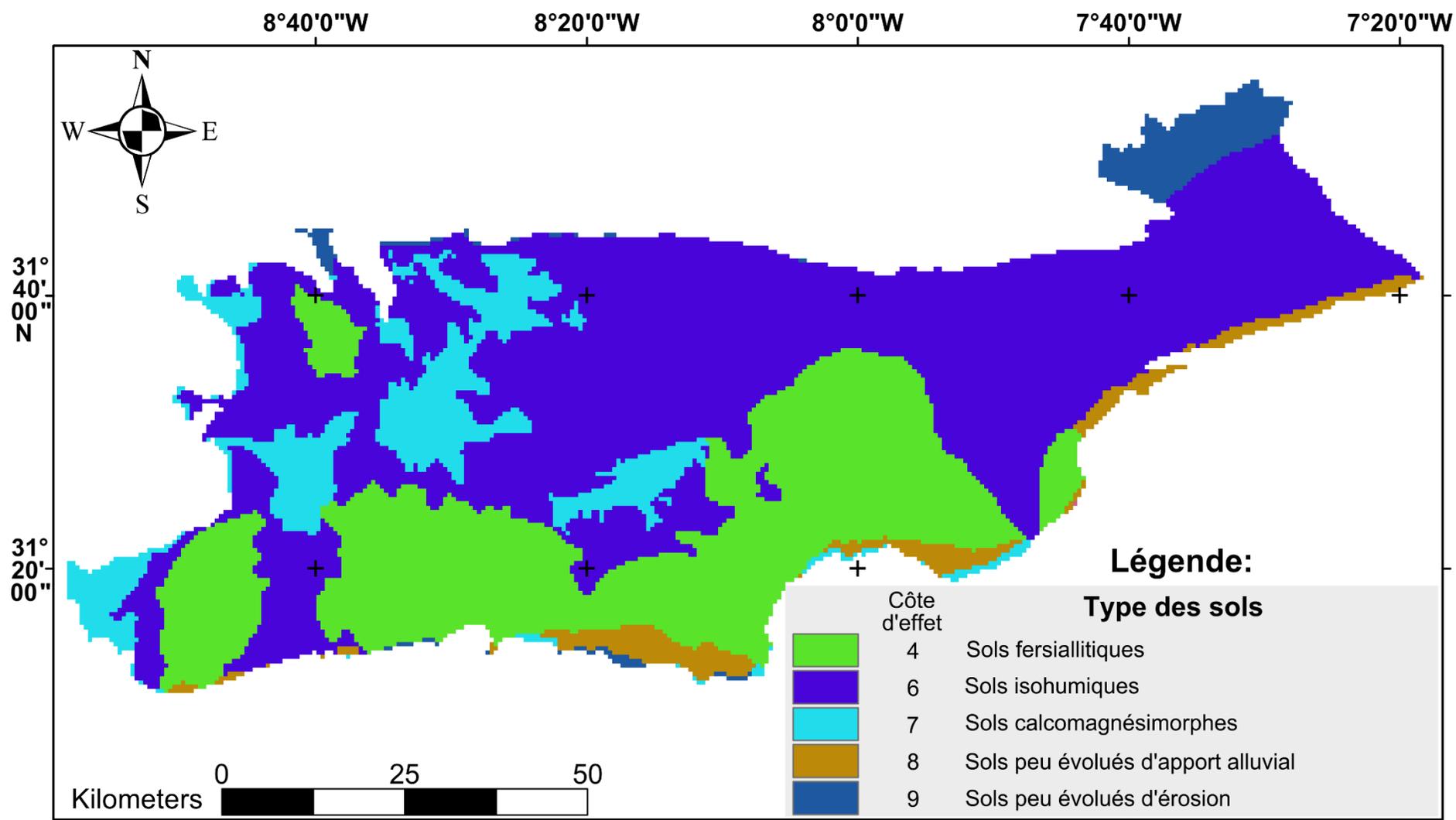


Figure 19 : Types des Sols du Haouz.

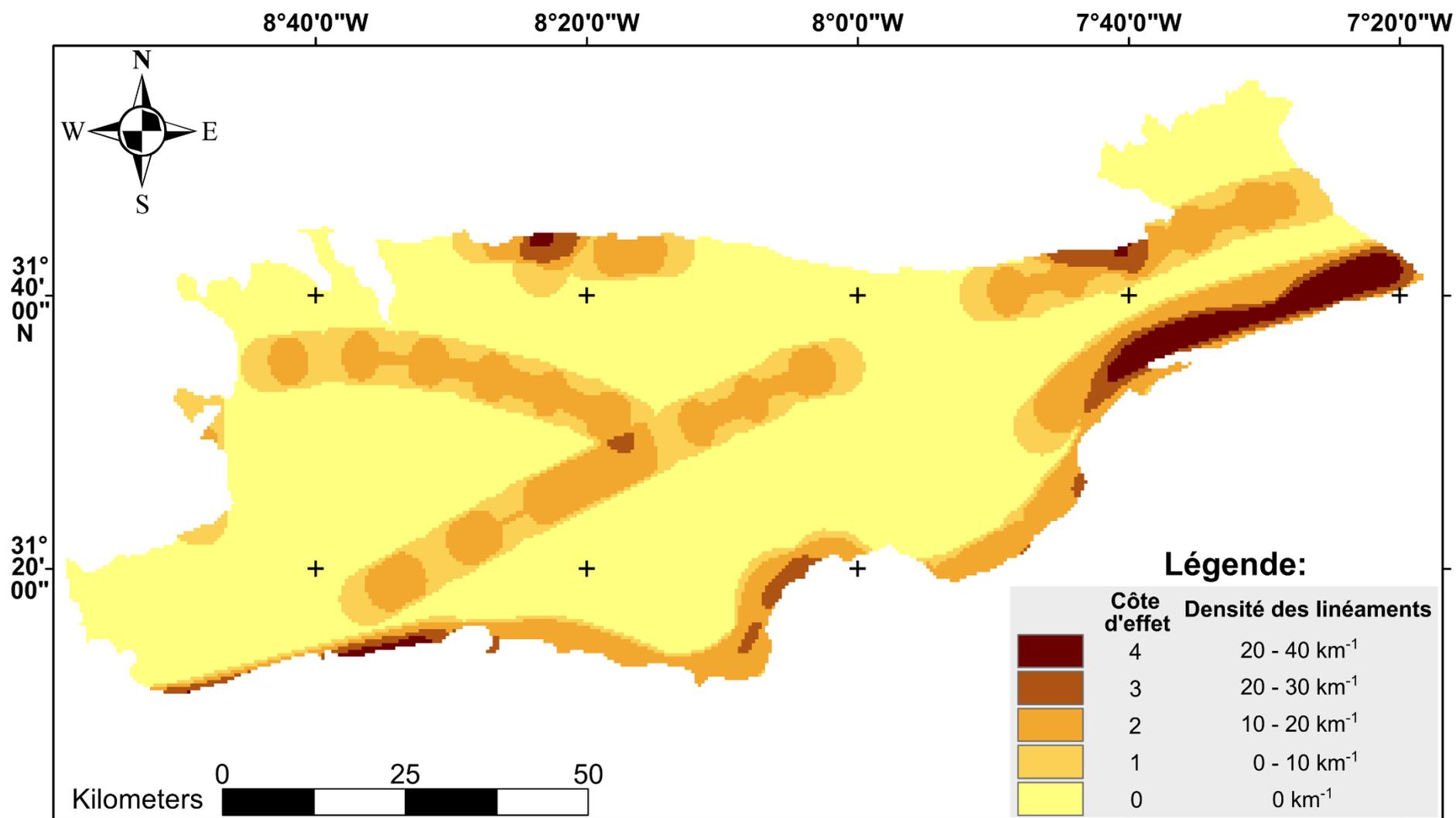


Figure 20 : Densité des linéaments du Haouz.

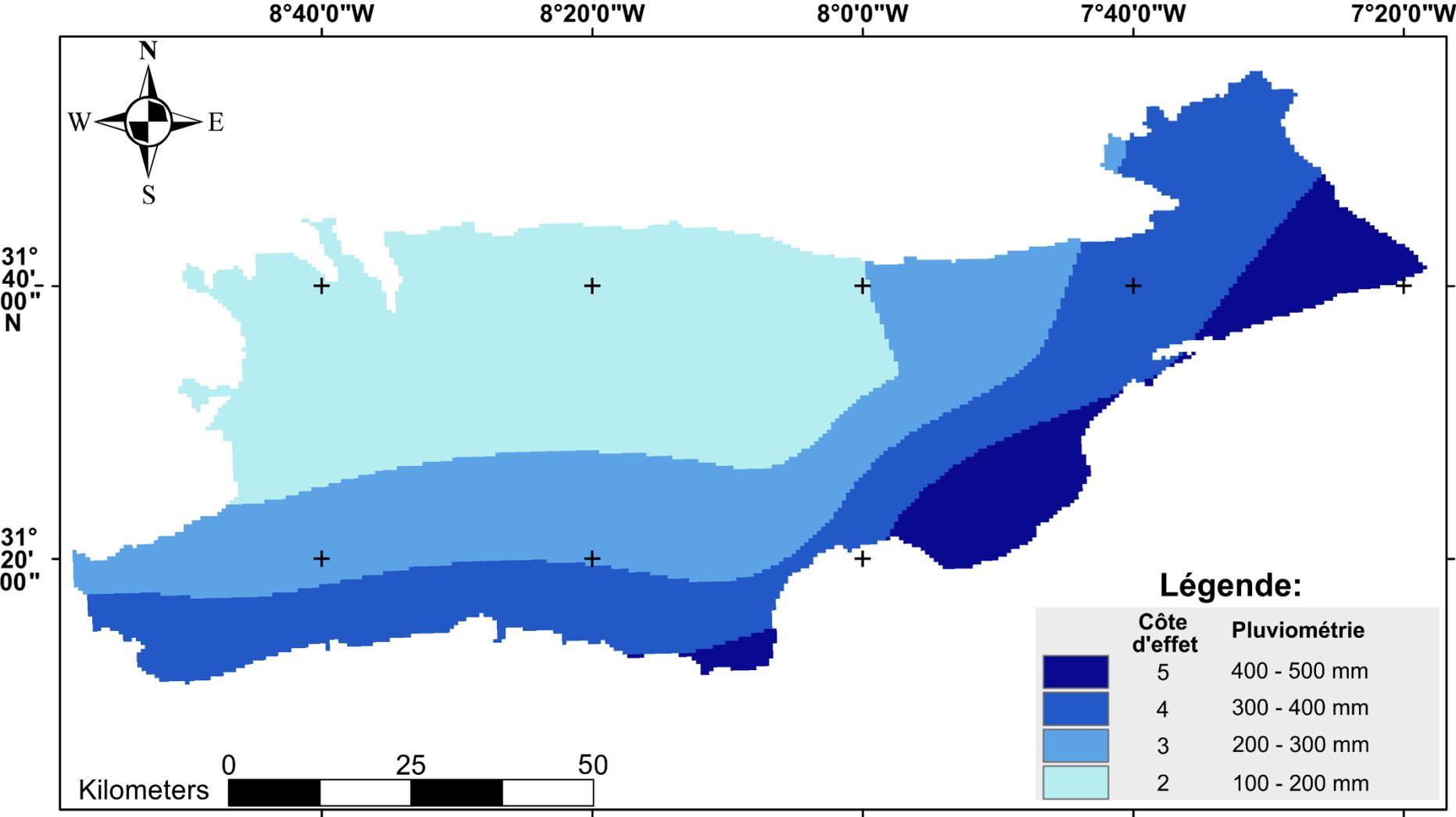


Figure 21 : Précipitations du Haouz.

3.2. Calcul de la contribution de chaque facteur

3.2.1. Évaluation des côtes

Une échelle des côtes a été déterminée sur la base des plages de variation des différents facteurs pour déterminer les côtes de tous les paramètres de façon homogène. Il y eu l'obtention de l'échelle suivante (Fig. 22) : Les paramètres ont été classifiés suivant cette échelle pour obtenir des côtes de chaque facteur indépendamment des autres. Le tableau 9 consigne les valeurs de côte obtenues pour tous les paramètres.

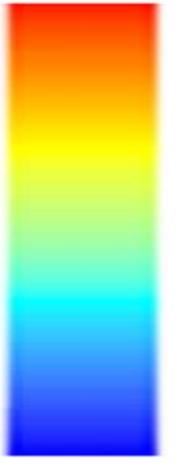
Classe	Intensité	
Très forte	10	
Forte		
Moyenne	5	
Faible		
Très faible	1	

Figure 22 : Échelle de l'intensité des sept paramètres régissant la recharge du Haouz.

Tableau 9 : Classification des paramètres régissant la recharge à la plaine du Haouz.

Facteur	Description de la classe	Côte d'effet
Lithologie	Très perméable : Formation modernes (Quaternaire), graviers, galets, sable.	10
	Perméable : limon, limon rose, conglomérats, conglomérats à ciment gréseux, grès.	8
	Peu perméable : évaporites, calcaire gréseux, calcaire lacustre, marne gréseuse, schistes.	5
	Imperméable : calcaire massif non fissuré, marne, silt, argile.	2
	Très imperméable : granite, quartzites, rhyolites, basalte.	1
Occupation du sol & couvert végétal	Culture annuelle et sol nu.	5
	Culture arbres et annuelles.	4
	Culture arbres et forêts.	3
	Barrage eau.	2
	Affleurement rocheux et aménagement urbain.	1
Densité de drainage (km ⁻¹)	2,0 ≤	1
	1,5 – 2,0	3
	1,0 – 1,5	5
	0,5 – 1,0	7
	0,0 – 0,5	9
Gradient de la pente (%)	0 – 1	10
	1 – 5	8
	5 – 15	6
	15 – 30	4
	30 – 45,9	2
Sols	Sols peu évolués d'érosion	9
	Sols peu évolués d'apport alluvial	8
	Sols calcomagnésimorphes	7
	Sols isohumiques	6
	Sols fersiallitiques	4
Densité des linéaments (km ⁻¹)	30 – 40	4
	20 – 30	3
	10 – 20	2
	00 – 10	1
Précipitations (mm)	400 – 500	5
	300 – 400	4
	200 – 300	3
	100 – 200	2

3.2.2. Détermination des poids

Une analyse des effets inter-paramètres (Fig. 13) a été effectuée pour estimer l'influence de chaque facteur vis-à-vis de la recharge. La lithologie identifie le type, le genre et la densité du couvert végétal. Ce dernier minimise l'érosion et les glissements de terrain. Un effet majeur 1,0 est donc attribué à la lithologie et un effet mineur 0,5 au couvert végétal.

En raison de la salinité et l'état des terrains, tous les sols dénudés sont presque dégradés. Le rôle du système racinaire et du feuillage des plantes est primordial pour les terres végétales et leur aptitude à l'infiltration. L'effet majeur est donc affecté aux deux paramètres.

Les faibles pentes correspondent aux dépressions des zones de plaine et aux lits des Oueds, là où se concentre la végétation. Cette dernière est presque inexistante dans les zones de forte pente (> 10%) sauf dans le cas de quelques zones forestières. Le couvert végétal est toujours influencé par la pente. Cette dernière a un rôle important parce qu'elle régit l'alimentation et les ruissellements. Le réseau hydrographique conditionne le couvert végétal qui se localise dans les rives des Oueds ou talwegs et à l'exutoire du bassin versant et de ses sous-bassins. Le couvert végétal freinant le ruissellement, un effet mineur lui est attribué.

L'attribution d'un effet majeur est évidente pour la lithologie et pour le réseau hydrographique parce que les deux facteurs sont en influence réciproque. La forme des cours d'eau résulte de la lithologie qui, elle, est alimentée par les apports solides des cours d'eau.

L'augmentation de la densité du réseau hydrographique révèle une zone de forte pente tandis qu'en plaine, les cours d'eau sont espacés et de faible densité. La pente a donc un effet majeur sur la densité du réseau.

Le réseau hydrographique a un effet majeur sur la pédologie, puisqu'il modifie le sol en le remaniant et en l'érodant.

La lithologie impose le gradient de la pente. Les formations montagneuses dures ont une forte pente, les plus friables une pente faible. La lithologie a donc un effet majeur sur la pente.

Les affleurements en surface sont à l'origine des sols après érosion : la nature du sol est donc définie par la nature des roches mères de ces affleurements. En déduisant encore un effet majeur pour la lithologie.

Les linéaments sont des fractures entraînant une augmentation de la porosité secondaire et la perméabilité ; de ce fait, ils influencent fortement le réseau hydrographique ainsi que l'occupation du sol.

L'intensité de la pluviométrie affecte directement l'intensité de drainage : effet majeur de la pluie sur le réseau hydrographique et effet mineur sur le sol.

Le tableau 10 montre comment le calcul a été effectué pour chaque facteur.

Tableau 10 : Effet des facteurs, poids et taux de contribution de chaque facteur du Haouz sur l'infiltration profonde dans la région du Haouz.

Facteur	Effet majeur (E_M)	Effet mineur (E_m)	Poids (E_M + E_m)	% Taux de contribution de chaque facteur
Lithologie	1 + 1 + 1 + 1 + 1	0	5,0	20
Occupation du sol & couvert végétal	1 + 1 + 1	0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,5	5,0	20
Drainage	1 + 1 + 1 + 1	0,5	4,5	18
Pente	1 + 1 + 1 + 1	0	4,0	16
Sol	1 + 1	0,5 + 0,5	3,0	12
Linéaments	1 + 1	0	2,0	8
Précipitations	1	0,5	1,5	6
	Total		25	100

3.2.3. Détermination des indices d'infiltration

La détermination de l'apport de chaque facteur dans la recharge potentielle a été faite par l'intégration de son poids et de sa côte (tableau 11).

Tableau 11 : Détermination des indices d'infiltration et du taux de contribution des facteurs sur la recharge potentielle du Haouz.

Facteur	Côte	Poids	Poids X côte	Indice d'infiltration	% Taux de contribution
Lithologie	10	5	50	130	23%
	8		40		
	5		25		
	2		10		
	1		5		
Occupation du sol & couvert végétal	5	5	25	72	12%
	4		20		
	3		15		
	2		10		
	1		2		
Drainage	1	4,5	4,5	112,5	19%
	3		13,5		
	5		22,5		
	7		31,5		
	9		40,5		
Pente	10	4	40	120	21%
	8		32		
	6		24		
	4		16		
	2		8		
Sol	9	3	27	102	18%
	8		24		
	7		21		
	6		18		
	4		12		
Linéaments	4	2	8	20	3%
	3		6		
	2		4		
	1		2		
Précipitations	5	1,5	7,5	21	4%
	4		6		
	3		4,5		
	2		3		
Total				577,5	100

3.2.4. Conception du modèle empirique estimant la recharge potentielle

Le modèle empirique calculant la recharge potentielle (Fig. 23 a, b et c) a été réalisé par compilation et intégration des cartes thématiques des différents paramètres en utilisant l'Équation 9 sous ArcGIS® 10.2.

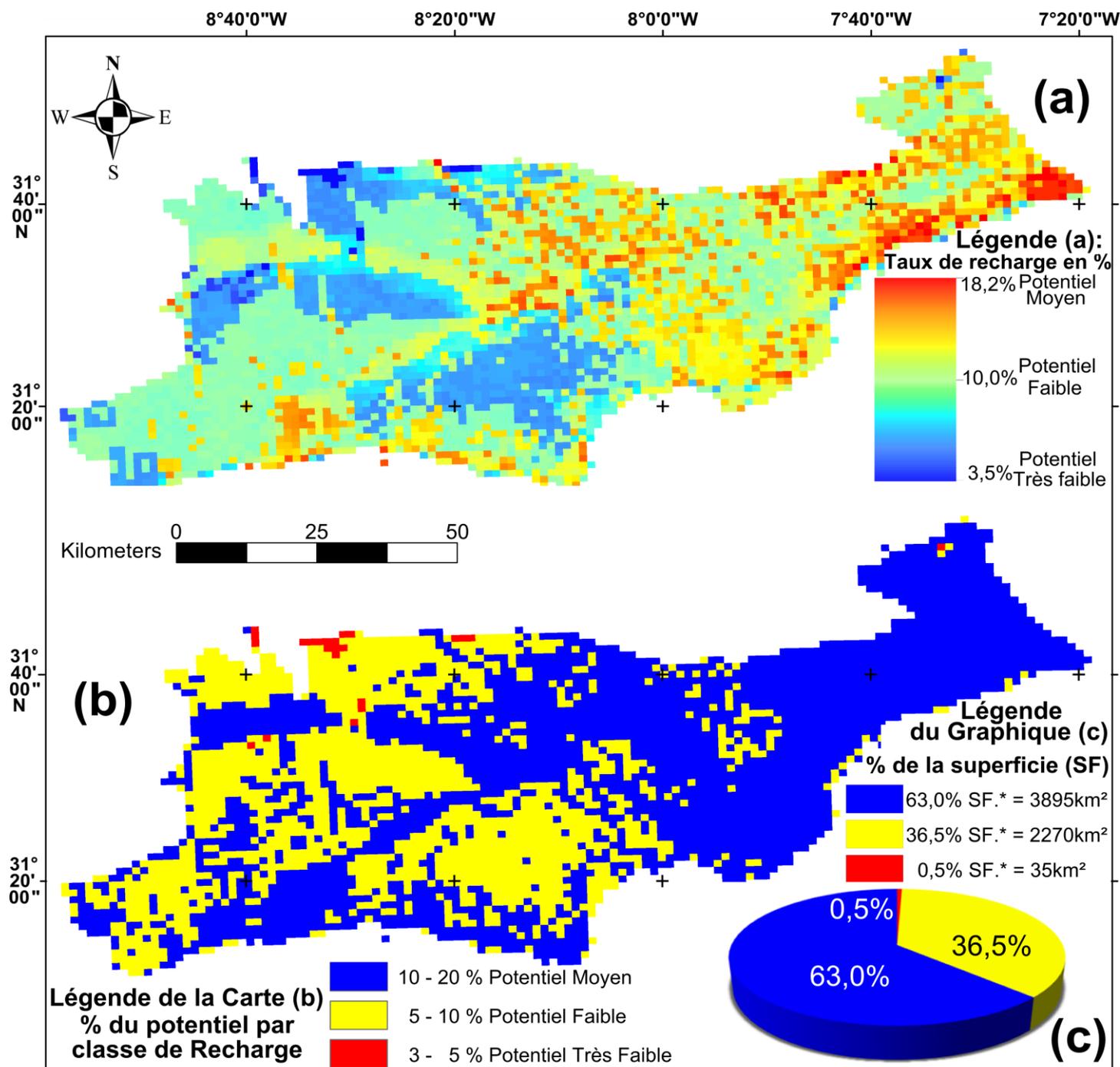


Figure 23 : Le modèle empirique calculant la recharge potentielle du Haouz développé par Ait El Mekki et Laftouhi (2016b).

a : Distribution du taux de recharge potentielle en pourcentage (%).

b : Distribution des classes de recharge potentielle.

c : Graphique présentant les % et les superficies correspondantes aux classes de recharge potentielle.

4. DISCUSSION

Situé dans un pays aride à semi-aride où les précipitations annuelles sont rares, l'eau souterraine est la seule ressource hydrique exploitable de la région. Pour cette raison, l'identification de la recharge potentielle reste un paramètre très important à déterminer afin d'adopter une gestion ferme et rigoureuse en vue de pérenniser cette ressource qui s'épuise jour après jour.

Dans ce sens, le présent travail a déterminé avec une acceptable précision les paramètres qui influencent cette inconnue. Il s'agit de : la lithologie, l'occupation du sol et le couvert végétal, la densité de drainage, la pente, les sols, les linéaments et les précipitations. La compilation et l'intégration de ces facteurs, à travers le couplage du SIG et la télédétection, ont donné naissance à un nouveau modèle empirique. Ce modèle peut être ajusté pour servir à n'importe quelle région tout en tenant compte des paramètres propres à cette dernière. À travers ce modèle, l'estimation de la recharge potentielle régionale est devenue aisée même si la superficie concernée est immense. Pour déterminer la recharge potentielle d'une année quelconque et en déduire une carte thématique, il suffit d'introduire les facteurs correspondant à cette année sous forme de couche de données pour qu'ils se compilent et s'intègrent.

Après compilation et intégration des différents facteurs, la carte synthèse (Fig. 23 a, b et c) révèle le potentiel de recharge dans la plaine du Haouz : le taux de recharge varie de 3,5 à 18,2 %. Ce zoning a été divisé en 3 classes : très faible taux de recharge potentiel inférieur à 5 %, entre 5 et 10 % faible taux de recharge et taux moyen entre 10 et 20 % (tableau 12).

Tableau 12 : Catégories du potentiel de la recharge ainsi que leurs estimations quantitatives du Haouz.

Catégorie du potentiel de recharge	Moyen	Faible	Très faible
Pourcentage déterminé	10–20 %	5–10 %	5 % >
Superficie (km ²)	3895	2270	35
Pourcentage des superficies	63 %	36,5 %	0,5 %

Les zones à très faible taux de recharge occupent seulement 0,5 % et sont situées à la limite nord-est de la région d'étude couvrant 35 km² à peine, tandis que les zones à faible taux s'élargissent sur 2 270 km², ce qui représente à peu près le tiers de la région (36,5 %), répandues principalement à l'est. Par contre, les zones à potentiel moyen couvrent le reste de la zone au milieu à l'est, mais surtout à l'ouest de la plaine, où elles occupent 63 % de la zone d'étude avec 3 895 km² de superficie.

Les zones à potentiel moyen sont situées au milieu à l'est et au sud-ouest de la plaine. Ces zones sont caractérisées par des formations géologiques peu imperméables et du Quaternaire, avec des pentes

faibles constituant des terrasses de plaine et des dépressions. La faible densité de drainage dans ces milieux permet à l'eau de pénétrer en profondeur ; par contre, la forte densité de linéaments dans ces zones a favorisé une porosité secondaire et l'augmentation de la perméabilité globale. Les sols de ces périmètres sont de classe isohumique avec des sols châtain, bruns et de type siérozem. L'effet du labourage, des cultures annuelles, les systèmes racinaires des arbres fruitiers et la nature de ce type de sol ont augmenté sa perméabilité. Par contre, au nord-ouest et au sud les terrains sont souvent imperméables avec des affleurements rocheux et une faible densité de linéaments, ce qui induit un faible potentiel de recharge.

Ce modèle empirique peut avoir de multiples utilisations dont notamment :

- Calcul de la recharge potentielle :

L'élaboration de ce modèle empirique permet le calcul de la recharge potentielle spatialisée déterminée dans l'espace et dans le temps sur de grandes étendues allant jusqu'à des milliers de km² dans des zones arides et semi-arides.

L'application du modèle a été réalisée sur 45 ans et est discutée dans le 5^{ème} chapitre.

- Système d'aide à la décision :

Dans ce volet, le modèle peut déterminer les zones à forte potentialité de recharge. Ces périmètres peuvent être le sujet d'aménagement de la recharge naturelle ou artificielle par implantation de puits ou de tranchées de recharge ou d'autres planifications. Ces zones doivent rester les plus naturelles possible et aucun projet urbain ou industriel ne doit être planifié dans lesdites régions. Les activités anthropiques peuvent quant à elles être installées dans les périmètres à faible potentialité de recharge, même si des éjections de polluants (zone industrielle) ou d'assainissement (zone urbaine) sont prévisibles. Ces contaminants atteindront en effet difficilement et en faible quantité la nappe pour malheureusement l'infecter, mais ça reste tolérable comparé au résultat catastrophique qui serait obtenu par la même source de polluants dans les régions à forte potentialité de recharge.

Les régions les plus arides, lesquelles sont souvent les plus pauvres, souffrent de la rareté de l'eau. Ce modèle constitue donc un outil très intéressant pour la bonne gouvernance de cette ressource naturelle étant donné qu'il peut couvrir des milliers de km² avec un budget très restreint. Le rapport qualité-prix de cette méthodologie est très satisfaisant.

5. CONCLUSION

Les problèmes liés à l'approvisionnement en eau dans les régions où règne le climat semi-aride à aride augmentent, car cette ressource est de plus en plus rare. De ce fait, la notion de recharge potentielle a une importance particulière dans toutes les études hydrogéologiques. La précision de son identification joue sur la qualité des réponses à donner pour résoudre les problématiques environnementales, agricoles, touristiques, urbaines, etc...

La conception d'une carte de recharge potentielle de la plaine du Haouz a révélé 3 classes de recharge, à savoir une zone à potentiel très faible inférieur à 5 %, une zone à potentiel faible entre 5 et 10 % et une zone à moyen potentiel allant de 10 à 20 %. La carte synthèse constitue une aide à la décision pour la planification des futurs projets de recharge artificielle avec l'identification des sites à fort potentiel de recharge. L'outil permet de calculer le volume annuel de pluie réellement infiltré.

Cette étude a développé un modèle empirique basé sur la compilation de différents paramètres régissant la recharge par l'utilisation de la télédétection et le SIG a rendu possible la prise de décisions pour une meilleure gestion et planification des ressources en eau sur de larges zones à climat aride et semi-aride, tout en réduisant les investissements nécessaires. Sous forme de couche de données, le résultat était présenté soit (en %), soit (en mm/an), soit les deux selon le but recherché.

Ce modèle a été validé par une approche hydrochimique pointue révélant un écart d'erreur inférieur à 15,5 % (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016a) qui est l'objet du 4^{ème} chapitre.

Enfin, comme perspective de ce chapitre, les périmètres révélant les plus forts potentiels de recharge vont être le terrain d'essais sophistiqués basés, *e.g.*, sur la méthode hydrochimique des bilans de chlorure (Cl⁻) (Ait El Mekki *et al.*, 2015).

**CHAPITRE 4. DÉTERMINATION DU TAUX
DE RECHARGE DES AQUIFÈRES PAR LE BIAIS DU
BILAN DE CHLORURES EN ZONE ARIDE À SEMI-
ARIDE. CAS DU PIÉMONT DU HAOUZ CENTRAL :
RHERAYA, ISSIL ET OURIKA,
MARRAKECH MAROC**

RÉSUMÉ

Le Maroc est considéré parmi les pays nord-africains touchés par une sécheresse progressive ces dernières années. Une grande partie du Royaume se caractérise par un climat aride à semi-aride où la demande en eau est fortement plus élevée que les apports annuels. La partie centrale du pays, représentée par la plaine du Haouz, traduit cette situation ; l'expansion agricole, l'épanouissement touristique sans oublier le développement industriel et minier ont posé à un conflit vis-à-vis de la ressource en eau. Ce qui oblige les décideurs à adopter une gestion rigoureuse afin de préserver cette ressource vitale en voie de dégradation.

En complément au chapitre précédent, le présent chapitre repose sur l'estimation du taux de recharge de l'aquifère au piémont liant le Haut Atlas et la plaine du Haouz Central par une méthode directe. C'est procédés purement hydrochimique s'appuyant sur la relation développée par Eriksson et Khunakasem en 1969 : the Chloride Mass-Balance Method. Elle repose sur la liaison entre la concentration des chlorures des eaux souterraines et celle des eaux pluviales avec la pluviométrie annuelle. L'utilisation d'un Système d'Information Géographique a permis de calculer la recharge régionale des 400 km² du périmètre ciblé pour cette étude. Cette approche a pu dévoiler le taux de recharge spatialisé sous forme de carte ; allant de 13 à 100 mm/an pour l'année hydrologique 2011–2012. Ce résultat a permis d'évaluer avec une certaine précision les résultats des modèles empiriques déterminant le taux de recharge sur de larges superficies dépassant les 6 200 km² comme la nappe du Haouz (Maroc).

Mots clés : Recharge des aquifères ; Régions semi-arides ; Chloride Mass-Balance Method (CMB) ; Système d'Information Géographique ; Plaine du Haouz (Maroc).

1. INTRODUCTION

L'eau est un facteur limitant des zones semi-arides touchées par la sécheresse pendant plusieurs années consécutives. L'évaluation et la gestion optimale de la ressource sont donc essentielles pour le Haouz, région qui subit un stress hydrique eu égard à une demande importante sans utilisation rationalisée, compliquée par des problèmes de qualité liés à l'expansion industrielle et minière, l'agriculture et l'urbanisation.

Actuellement la nappe Mio-Plio-Quaternaire du Haouz fournit plus de 400 millions de m³ pour irriguer, en totalité ou en partie, plus de 200 000 ha (Abourida, 2007). Durant les dernières années de sécheresse, le volume fourni à l'irrigation est estimé à plus de 1,30 milliard de m³/an (Abourida *et al.*, 2008). La connaissance du taux de recharge devient alors une nécessité primordiale. Pour parvenir à une bonne estimation de ce taux, plusieurs méthodes sont disponibles, en particulier les très pertinentes méthodes hydrochimiques. L'hydrochimie devient d'ailleurs de plus en plus fondamentale pour résoudre des problèmes d'hydrologie ou d'hydrogéologie (Eriksson, 1981; Rétháti, 1983; Hughes et Heathwaite, 1995; Peters et Coudrain-Ribstein, 1997; Dutton, 1998; Mazor, 2003; Worch, 2003; Adelana et MacDonald, 2008; Lambrakis *et al.*, 2011). Plusieurs auteurs ont déjà utilisé des approches hydrochimiques (Allison *et al.*, 1985; Adar *et al.*, 1988; Adar et Neuman, 1988; Rosenthal *et al.*, 1990; Howard et Mullings, 1996; Genxu et Guodong, 2001; Al-Bassam et Al-Rumikhani, 2003; Stigter *et al.*, 2006; Fernandes *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2012; Hagedorn, 2015) et géochimiques (Holland, 1972; Meybeck et Helmer, 1989; Dissanayake, 1991; Chapelle, 2001; Welch et Stollenwerk, 2003; Glynn et Plummer, 2005; Ma *et al.*, 2005; Xiao *et al.*, 2012; El Moukhayar *et al.*, 2014; Xiao *et al.*, 2014) pour répondre à diverses questions relatives à la ressource vitale et sa gestion optimale. Ce travail propose de calculer le taux de recharge par une méthode hydrochimique pointue.

Les outils utilisés sont des traceurs, éléments majeurs et mineurs analysés de manière sophistiquée, tout en observant leurs réactions dans le milieu. Le taux de recharge des aquifères est une donnée capitale en hydrogéologie pour mieux connaître les réservoirs et les gérer.

L'objectif ici est l'estimation de la recharge par infiltration grâce aux chlorures en utilisant the *Chloride Mass-Balance method* (CMB) développée par Eriksson et Khunakasem (1969) appelée également *Chloride Budget Technique*. Cette méthode a été appliquée avec succès par plusieurs spécialistes dans presque dans tous les continents : Afrique (Edmunds *et al.*, 1988; Takounjou *et al.*, 2010; Diouf *et al.*, 2013), en Asie (Ting *et al.*, 1998; Subyani, 2004; Liu *et al.*, 2009; Marei *et al.*, 2010; Huang et Pang, 2010), en Europe (Lo Russo *et al.*, 2003; Alcalá et Custodio, 2014), en Australie (Allison et Hughes, 1978; Guan *et al.*, 2009) et en Amérique (Sophocleous, 1991; Scanlon, 1991;

Murphy *et al.*, 1996; Nolan *et al.*, 2007). Elle est utilisable en zones saturées et non saturées (Edmunds *et al.*, 2002). Elle est également applicable sous divers climats : aride (Gee et Hillel, 1988; Fouty, 1989), semi-aride (Wood *et al.*, 1997; Subyani et Şen, 2006; Rödiger *et al.*, 2014) et humide (Saghravani *et al.*, 2014). Au Maroc, elle n'a toutefois jamais été utilisée (Ait El Mekki *et al.*, 2015).

Wood (2014) a démontré la précision de cette méthode ponctuellement ou globalement dans un cas très particulier d'état stable chimiquement homogène dans un aquifère isotrope sans sources de chlorures autres que les précipitations. Avec une valeur spatiale et temporelle constante de chlorure dans la précipitation, un seul échantillon d'eau souterraine suffirait pour estimer la recharge régionale de l'ensemble de l'aquifère. Cependant, avec un aquifère hétérogène, ce qui est le cas de presque tous les aquifères naturels, la densité d'échantillonnage devient critique pour une estimation non biaisée de la concentration moyenne en chlorures, ainsi que du flux de recharge moyen. Un problème se pose alors sur la représentabilité de ces concentrations.

La nouveauté repose sur le recours à la géomatique en élaborant un SIG qui spatialise les variables en interpolant les données recueillies afin d'avoir, en chaque point, un couple de données spécifique permettant d'appliquer la relation tout en conservant la fiabilité des données d'entrée. Le périmètre étudié est une zone de piémont du Haouz Central, de climat semi-aride et comportant les sous-bassins des trois Oueds : Rheraya, Issil et Ourika.

L'objectif majeur de cette étude réside dans l'estimation de la recharge régionale du piémont étudié, étant donné que les résultats de cette étude permettront aussi de valider les modèles empiriques sur de larges superficies dépassant les 6 200 km² comme la nappe du Haouz.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude est située entre 7°46'42"W et 7°57'55"W, 31°19'10"N et 31°31'10"N (Fig. 24 a et b). Il s'agit d'un piémont compris entre le Haut Atlas au sud et le Haouz Central au nord d'une superficie de 400 km². La carte (Fig. 24 c) montre que la région est formée en sa majorité par des alluvions quaternaires et aussi des formations gréseuses continentales du Permo-Trias, du Sénonien à faciès continental à composition marno-calcaires et la présence d'affleurements rocheux situés au sud la région et accidentés au sud-est (Piqué *et al.*, 2007). La distance minimale entre l'extrême ouest du périmètre étudié et l'Océan Atlantique est d'environ 200 km (Fig. 24 a et b). Il n'y a donc aucune contamination par ces eaux et aucune activité volcanique n'est enregistrée dans le secteur (Ait El Mekki *et al.*, 2015).

Le relief de ce piémont varie entre 583 et 1358 m. Cette zone est drainée par deux affluents de l'Oued Tensift venus du Haut Atlas : Oued Ourika et le Rheraya ; elle est aussi le départ de Oued Issil. La majorité du temps ce réseau hydrographique est à sec (Fig. 25), sauf pendant la fonte des neiges ou à la suite de pluies exceptionnelles. Ce périmètre est marqué par un climat semi-aride. Les températures moyennes mensuelles sur une période de 30 ans subissent une variation entre 18,5 °C et 20,5 °C ; le mois le plus froid est janvier (11 à 13 °C) et les mois les plus chauds sont juillet et août (25 °C à 27 °C) (ABHT : Agence du Bassin Hydraulique de Tensift, Marrakech, Maroc).

D'après la carte piézométrique (Fig. 24 c), il n'y a aucune interaction entre l'eau de surface et les eaux souterraines au niveau du piémont des trois Oueds durant l'année hydrologique 2011–2012 (Ait El Mekki *et al.*, 2015).

La nappe phréatique est une importante nappe généralisée constituée d'alluvions mio-plio-quaternaires sous forme de dépôts détritiques issus du démantèlement de la chaîne atlasique par les différents Oueds (Sinan, 2000).

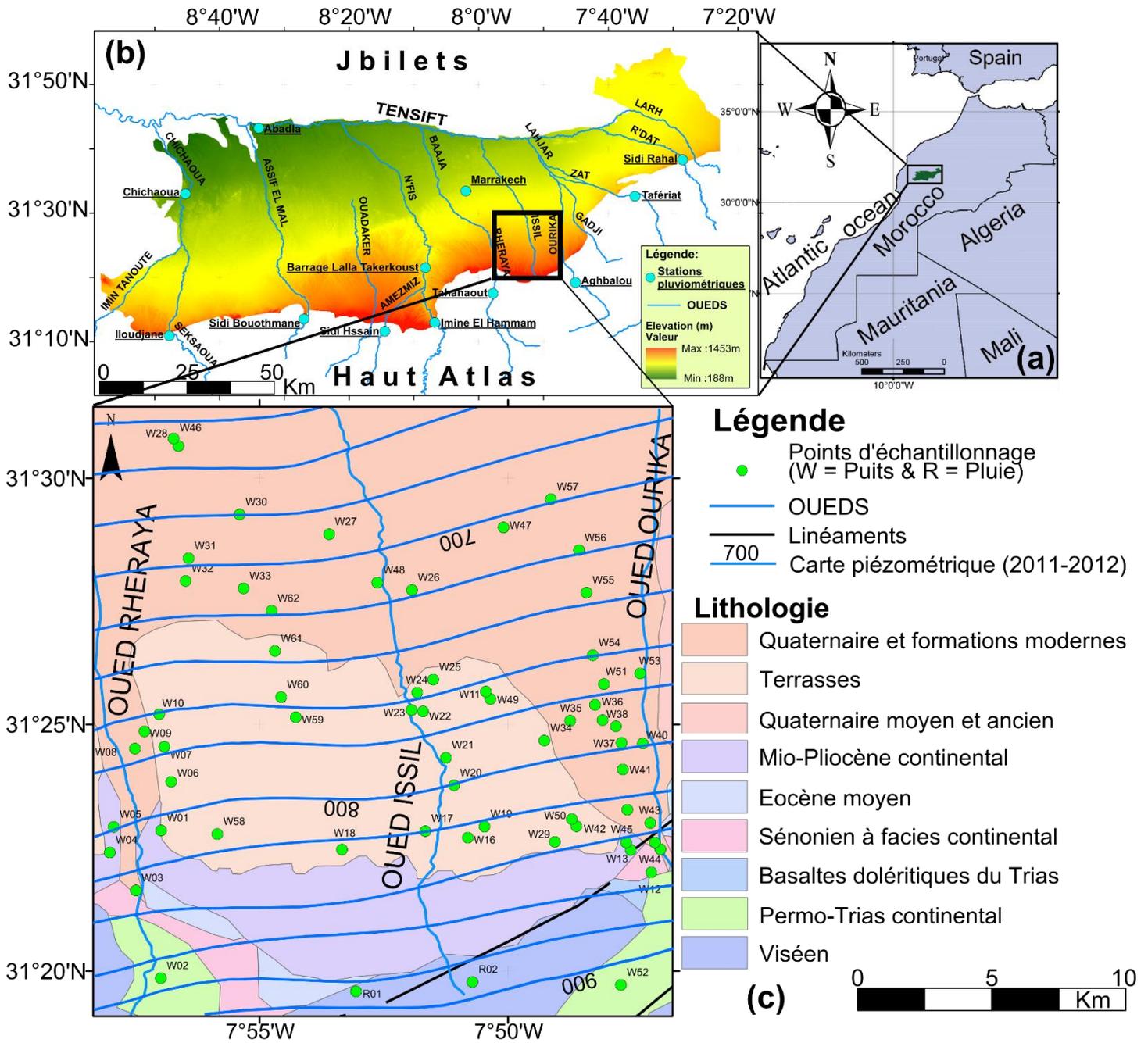


Figure 24 : La zone d'étude : le piémont du Haouz Central (sous bassin de : Rheraya, Ourika et Issil) (Ait El Mekki *et al.*, 2015).

a : Situation géographique du Haouz

b : Positionnement des stations pluviométriques et des Oueds sur un MNT (ASTER GDEM)

c : Positionnement des points d'échantillonnage (pluie et puits)

sur un fond géologique superposé par une carte piézométrique de 2011-2012

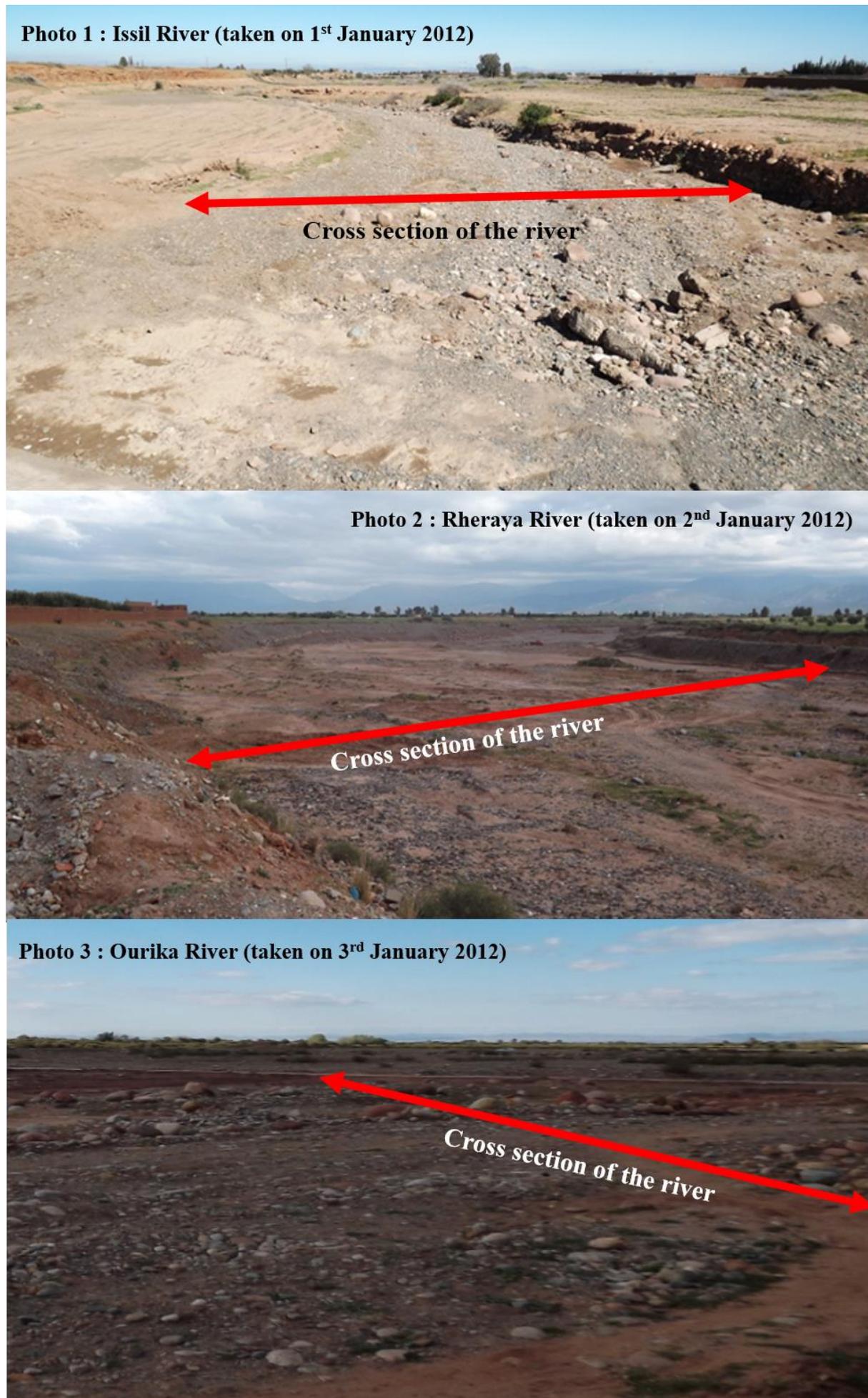


Figure 25 : Photos des trois Oueds étudiés du Haouz Central.

2.2. Méthodologie

La méthodologie adoptée repose sur l'utilisation de la CMB. Cette méthode a pour but la déduction du taux de recharge des eaux pluviales tout en s'appuyant sur un élément majeur très important. Les hydrogéologues le considèrent comme un traceur hydrochimique ; il s'agit des chlorures (Cl^-). Ce traceur est un atome de chlore chargé d'un électron supplémentaire ; c'est un ion négatif (anion). Il est produit lors de la dissociation du chlorure d'hydrogène dans l'eau. Les chlorures (Cl^-) utilisés sont ceux des eaux de surface et des eaux souterraines, tout en ajoutant le volume annuel des précipitations (Ait El Mekki *et al.*, 2015).

2.2.1. The Chloride Mass-Balance Method (CMB)

La méthode CMB, développée par Eriksson et Khunakasem (1969), est décrite par plusieurs auteurs et utilisée dans divers climats et dans tous les continents (Eriksson, 1981; Dettinger, 1989; Wood et Sanford, 1995; Bazuhair et Wood, 1996; Wood, 1999; Subyani, 2004; Gee *et al.*, 2005; Somaratne et Smettem, 2014; Ait El Mekki *et al.*, 2015).

Le principe de cette approche repose sur le fait que la seule source de chlorures dans la zone non saturée provient des précipitations. La concentration augmente dans le sol jusqu'à atteindre l'aquifère puisque la plupart des plantes n'en consomment pas. Le taux de recharge décroît donc avec la concentration en chlorures : plus leur concentration dans le sol est élevée, plus le taux de recharge est faible.

Les conditions d'utilisation de cette méthode sont :

- la suffisance de chlorures contenus dans les précipitations ;
- l'inexistence d'autres sources de chlorure dans le sol ou dans l'aquifère (rejet urbain ou industriel, activité minière ou agricole) ;
- la constance de la concentration en chlorure dans la pluie (pas de pluie acide).

La détermination de la recharge à partir des eaux pluviales est calculée en utilisant l'Équation 10 (Eriksson et Khunakasem, 1969).

$$\text{Équation 10} \quad R = \frac{P \times C_p}{C_i} - \frac{Q \times C_q}{C_i}$$

Où :

- R : recharge efficace ($L^3 T^{-1}$) ;
- P : précipitation efficace annuelle ($L^3 T^{-1}$) ;
- C_p : concentration des chlorures des eaux pluviales (ML^{-3}) ;
- C_q : concentration moyenne des chlorures dans les eaux de ruissellement (ML^{-3}) ;
- C_i : concentration des chlorures des eaux souterraines (ML^{-3}) ;
- Q : débit moyen algébrique de ruissellement ($L^3 T^{-1}$).

En général, les ruissellements dans ce type de climat ont tendance à s'évaporer ou à s'infiltrer en aval des montagnes. Ils sont alors considérés négligeables (Dettinger, 1989) et l'Équation 10 se simplifie en Équation 11 :

$$\text{Équation 11} \quad R = P \times \frac{C_p}{C_i}$$

Où $Q = 0$

2.2.2. Détermination des variables

2.2.2.1. Détermination des précipitations efficaces annuelles (P) du Haouz Central

La pluviométrie efficace a été mesurée, avec un pas journalier, durant le cycle hydrologique 2011–2012 à partir des données des 12 stations pluviométriques réparties sur tout le Haouz (Ait El Mekki *et al.*, 2015).

2.2.2.2. Détermination de la concentration

2.2.2.2.1. Échantillonnage

L'eau pluviale a été prélevée deux fois, en novembre et en décembre 2011 ; l'eau souterraine a été échantillonnée à travers 62 puits bien répartis sur la zone d'étude pendant une campagne piézométrique effectuée au mois de janvier au milieu de l'année hydrologique 2011–2012, période coïncidant avec le début des hautes eaux.

2.2.2.2.2. Détermination des concentrations en chlorures du Haouz Central

Sur site, seuls ont été mesurés des paramètres physiques avec des appareils Yokogawa : pH, conductivité et température. Les échantillons destinés au laboratoire ont été prélevés avec un protocole rigoureux : deux échantillons à chaque fois, le premier destiné au dosage des bicarbonates a été conservé dans des flacons en polyéthylène de 500 ml ; le second, destiné à l'analyse par chromatographie ionique (CI), a été placé dans des flacons en verre teinté de 60 ml.

Tous les échantillons ont été conservés dans une glacière puis dans un réfrigérateur à une température comprise entre 3 et 4 °C jusqu'à analyse.

Les chlorures sont analysés par CI en utilisant un Dionex ICS (AS) 1100. Ces analyses ont été effectuées dans le Centre d'Analyses et de Caractérisation (CAC) relevant de la FSSM de l'UCA.

2.2.3. Spatialisation de la pluviométrie et des concentrations des chlorures du Haouz Central

Plusieurs auteurs (Somaratne et Smettem, 2014) confirment la validité de la CMB ponctuellement ou dans un aquifère homogène et stable chimiquement. Or, les aquifères naturels sont hétérogènes avec de grandes variations chimiques. La CMB n'est dès lors pas considérée comme applicable à une échelle régionale : quelle valeur convient-il d'utiliser dans l'Équation 11 ? Il est possible de répondre à cette question après spatialisation des trois paramètres de la relation 11. Chaque pixel ayant sa pluviométrie et sa concentration. La construction de la carte de la recharge est devenue possible.

La transformation des différentes données mesurées en couches de données isovaleur a été réalisée par interpolation avec l'inverse de la distance pondérée (IDW) (Philip et Watson, 1982; Watson et Philip, 1985; Childs, 2004; Yang *et al.*, 2007). La couche de données de la distribution des précipitations 2011–2012 a été obtenue en utilisant les données des 12 stations pluviométriques (ABHT) interpolées par IDW. La couche de la distribution des chlorures dans les eaux souterraines a été construite à partir des 62 puits. Le logiciel ArcGIS® 10.2 a servi à l'élaboration du SIG. Le calcul par l'Équation 11, avec ses variables spatialisées en couches de données au format Raster, est rendu possible grâce au module Spatial Analyst Tools (Map Algebra \ Raster Calculator).

3. RÉSULTATS

3.1. Précipitation du Haouz Central

Les données des 12 stations pluviométriques du cycle hydrologique 2011–2012 montrent une moyenne globale de l'ordre 317 mm/an, la valeur la plus basse se trouvant à la station Abadla avec 173 mm/an, et le maximum à la station de Tahanaout avec 470 mm/an ; dans la zone d'étude, le minimum et le maximum sont respectivement 281 et 519 mm/an. Une interpolation spatialisée par IDW permet de dessiner la distribution de la pluviométrie (Fig. 26). Cette carte correspond à la variable P dans l'Équation 11.

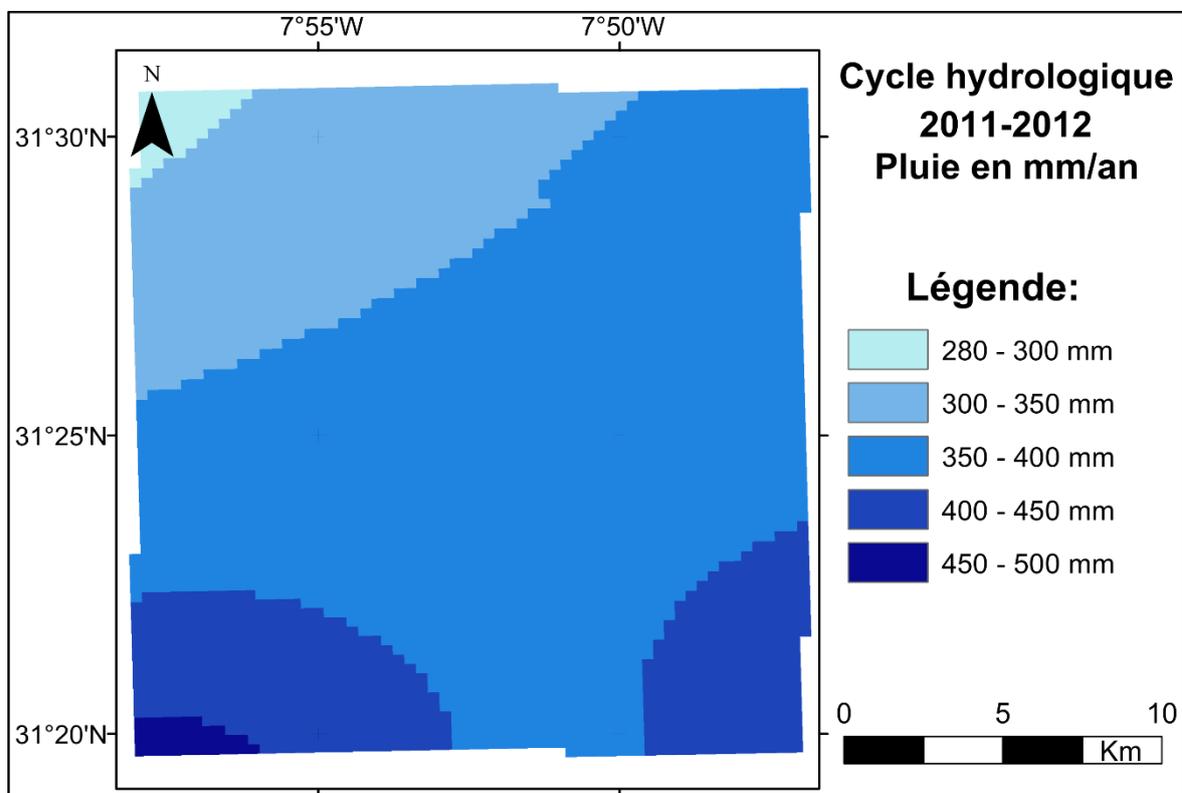


Figure 26 : Carte de distribution des précipitations (en mm/an) du Haouz Central de l'année hydrologique 2011–2012.

3.2. Concentration des chlorures des eaux pluviales et souterraines du Haouz Central

Le tableau 13 consigne les paramètres physiques et les concentrations en chlorure. Les concentrations dans l'eau pluviale de novembre et décembre sont trop proches, au voisinage de 11,5 mg L⁻¹, soit C_p dans l'Équation 11. La concentration dans l'eau souterraine varie entre 14 à 361 mg L⁻¹. L'interpolation permet d'obtenir la carte de distribution des concentrations (Fig. 27). Cette carte était considérée comme la variable C_i dans l'Équation 11.

Tableau 13 : Composition en chlorures (en mg L⁻¹) des précipitations et des eaux souterraines du Haouz Central.

No.	Nature	Type d'eau	Date	Longitude (°)*	Latitude (°)*	[Cl] (mg L ⁻¹)
R01	Pluie	Rw*	11/2011	-7,88400	31,32600	11,5105
R02	Pluie	Rw	12/2011	-7,84500	31,33200	11,4849
W01	Puits	Gw*	01/2012	-7,94971	31,38079	289,8025
W02	Puits	Gw	01/2012	-7,94984	31,33088	270,0859
W03	Puits	Gw	01/2012	-7,95820	31,36055	264,8087
W04	Puits	Gw	01/2012	-7,96697	31,37342	271,2423
W05	Puits	Gw	01/2012	-7,96560	31,38208	360,6405
W06	Puits	Gw	01/2012	-7,94634	31,39724	321,5109
W07	Puits	Gw	01/2012	-7,94857	31,40911	209,0568
W08	Puits	Gw	01/2012	-7,95852	31,40847	147,4853
W09	Puits	Gw	01/2012	-7,95535	31,41432	191,1957
W10	Puits	Gw	01/2012	-7,95036	31,42009	163,0371
W11	Puits	Gw	01/2012	-7,83921	31,42530	25,7170
W12	Puits	Gw	01/2012	-7,78525	31,36671	20,5686
W13	Puits	Gw	01/2012	-7,79217	31,37428	24,7632
W14	Puits	Gw	01/2012	-7,78221	31,37445	96,0487
W15	Puits	Gw	01/2012	-7,81035	31,38225	51,8383
W16	Puits	Gw	01/2012	-7,84680	31,37844	145,9234
W17	Puits	Gw	01/2012	-7,86105	31,38063	92,5382
W18	Puits	Gw	01/2012	-7,88906	31,37440	27,4482
W19	Puits	Gw	01/2012	-7,84115	31,38212	165,8190
W20	Puits	Gw	01/2012	-7,85140	31,39612	116,9393
W21	Puits	Gw	01/2012	-7,85412	31,40541	117,9560
W22	Puits	Gw	01/2012	-7,86185	31,42110	98,4816
W23	Puits	Gw	01/2012	-7,86570	31,42153	149,6134
W24	Puits	Gw	01/2012	-7,86378	31,42747	88,6706
W25	Puits	Gw	01/2012	-7,85838	31,43182	171,6162

(Rw = eau pluviale; Gw = eau souterraine)

* Coordonnées en degrés décimaux (*Coordinates system: GCS Merchich Degree*)

Suite du tableau à la page suivante

Suite du tableau 13 :

No.	Nature	Type d'eau	Date	Longitude (°)*	Latitude (°)*	[Cl ⁻] (mg L ⁻¹)
W26	Puits	Gw	01/2012	-7,86557	31,46216	75,0355
W27	Puits	Gw	01/2012	-7,89336	31,48095	94,9147
W28	Puits	Gw	01/2012	-7,94388	31,51082	184,0986
W29	Puits	Gw	01/2012	-7,81757	31,37695	87,4206
W30	Puits	Gw	01/2012	-7,92334	31,48767	195,6960
W31	Puits	Gw	01/2012	-7,94052	31,47293	97,4012
W32	Puits	Gw	01/2012	-7,94151	31,46521	100,2156
W33	Puits	Gw	01/2012	-7,92207	31,46269	187,7759
W34	Puits	Gw	01/2012	-7,82113	31,41121	35,7094
W35	Puits	Gw	01/2012	-7,81244	31,41794	25,9241
W36	Puits	Gw	01/2012	-7,80407	31,42332	56,2204
W37	Puits	Gw	01/2012	-7,80164	31,41812	58,9769
W38	Puits	Gw	01/2012	-7,79711	31,41600	57,3124
W39	Puits	Gw	01/2012	-7,78810	31,41023	32,4079
W40	Puits	Gw	01/2012	-7,79524	31,41043	13,9901
W41	Puits	Gw	01/2012	-7,79476	31,40147	46,1923
W42	Puits	Gw	01/2012	-7,79329	31,38787	104,9926
W43	Puits	Gw	01/2012	-7,78559	31,38334	107,6751
W44	Puits	Gw	01/2012	-7,78400	31,37676	88,6856
W45	Puits	Gw	01/2012	-7,79374	31,37682	23,2708
W46	Puits	Gw	01/2012	-7,94552	31,51331	154,8350
W47	Puits	Gw	01/2012	-7,83488	31,48335	81,5666
W48	Puits	Gw	01/2012	-7,87715	31,46463	47,2504
W49	Puits	Gw	01/2012	-7,84076	31,42779	18,2450
W50	Puits	Gw	01/2012	-7,81193	31,38467	38,5559
W51	Puits	Gw	01/2012	-7,80113	31,43031	71,4605
W52	Puits	Gw	01/2012	-7,79545	31,32860	39,3922
W53	Puits	Gw	01/2012	-7,78898	31,43396	38,4962
W54	Puits	Gw	01/2012	-7,80485	31,44003	79,0671
W55	Puits	Gw	01/2012	-7,80694	31,46126	99,9467
W56	Puits	Gw	01/2012	-7,80955	31,47558	80,0577
W57	Puits	Gw	01/2012	-7,81889	31,49285	48,1516
W58	Puits	Gw	01/2012	-7,93084	31,37957	287,6349
W59	Puits	Gw	01/2012	-7,90446	31,41916	19,0713
W60	Puits	Gw	01/2012	-7,90944	31,42594	87,4032
W61	Puits	Gw	01/2012	-7,91156	31,44152	86,4914
W62	Puits	Gw	01/2012	-7,91261	31,45505	75,8798

(Rw = eau pluviale; Gw = eau souterraine)

* Coordonnées en degrés décimaux (*Coordinates system: GCS Merchich Degree*)

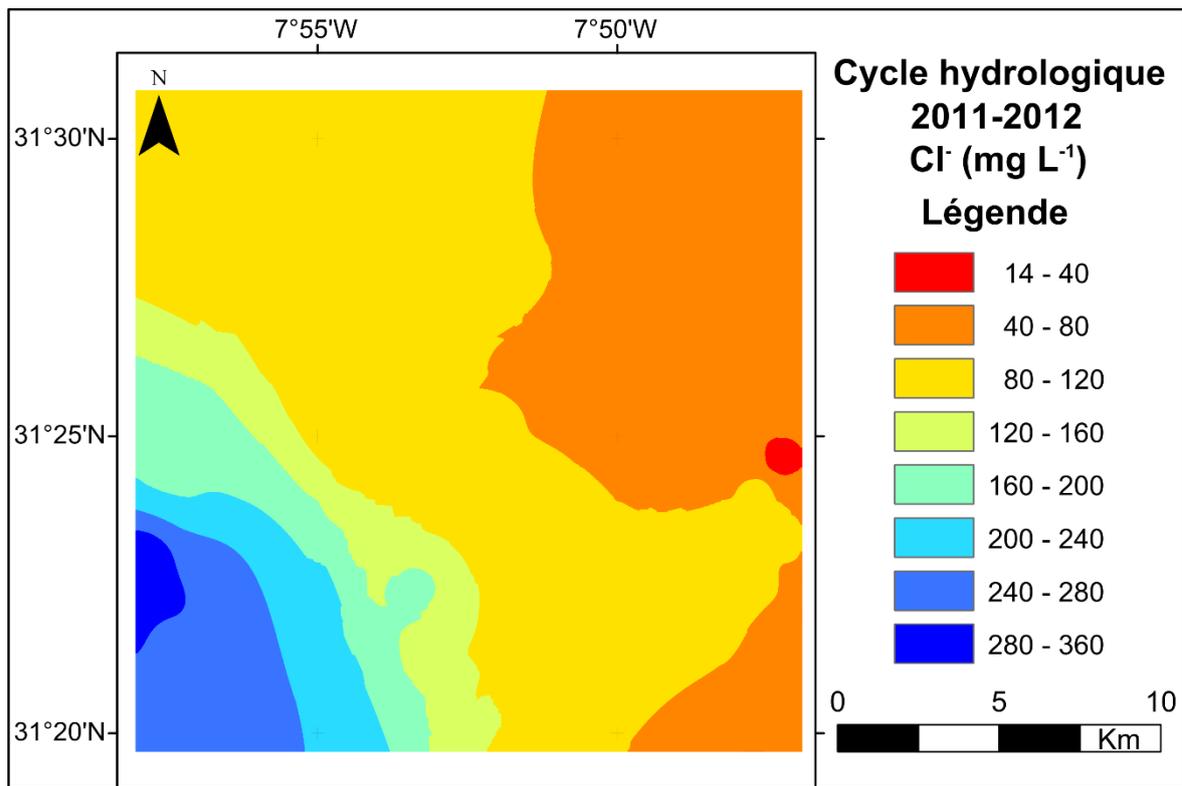


Figure 27 : Carte de distribution des chlorures (en mg L⁻¹) dans les eaux souterraines du Haouz Central ;
année hydrologique 2011–2012.

3.3. Carte de la recharge régionale du Haouz Central

Après avoir préparé les variables spatialisées en couches de données au format Raster. L'application de l'Équation 11 aboutit à la conception de la carte de recharge régionale. Cette dernière varie entre 12 et 100 mm/an (Fig. 28), avec un pourcentage allant de 3 à 25 % (Fig. 29).

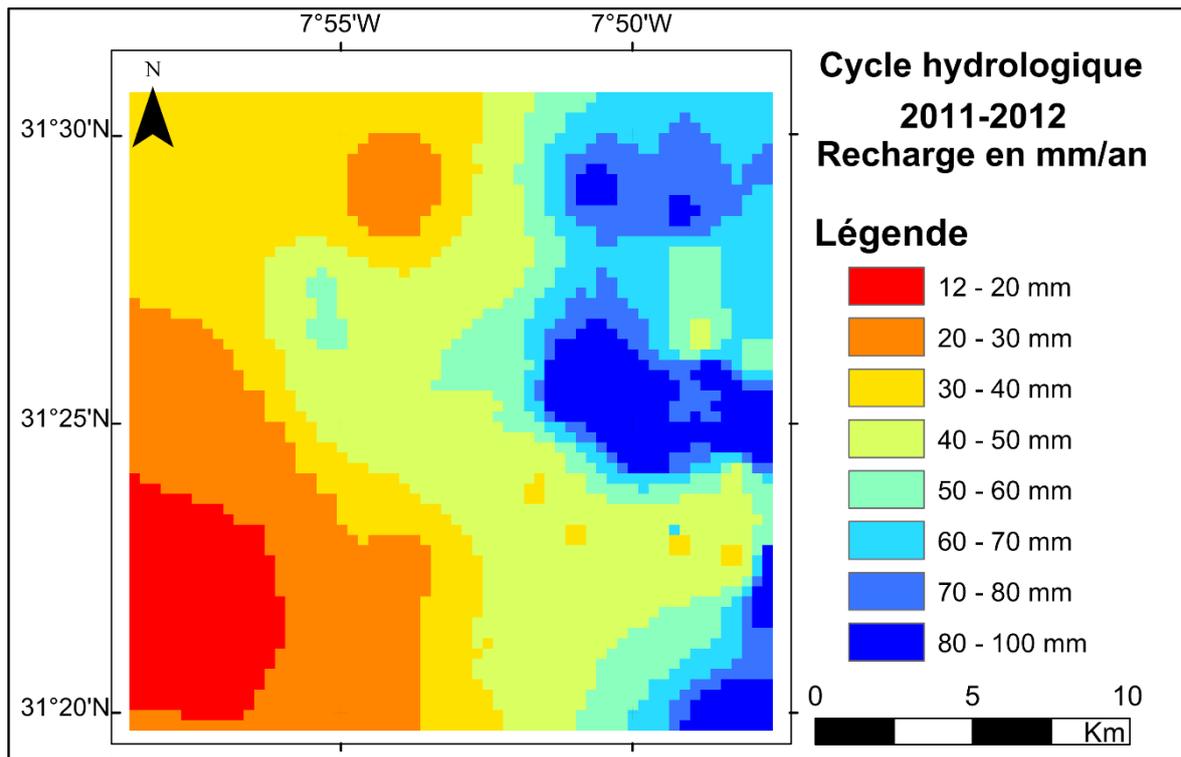


Figure 28 : Carte de distribution de la recharge spatialisée (en mm/an) du Haouz Central de l'année hydrologique 2011–2012.

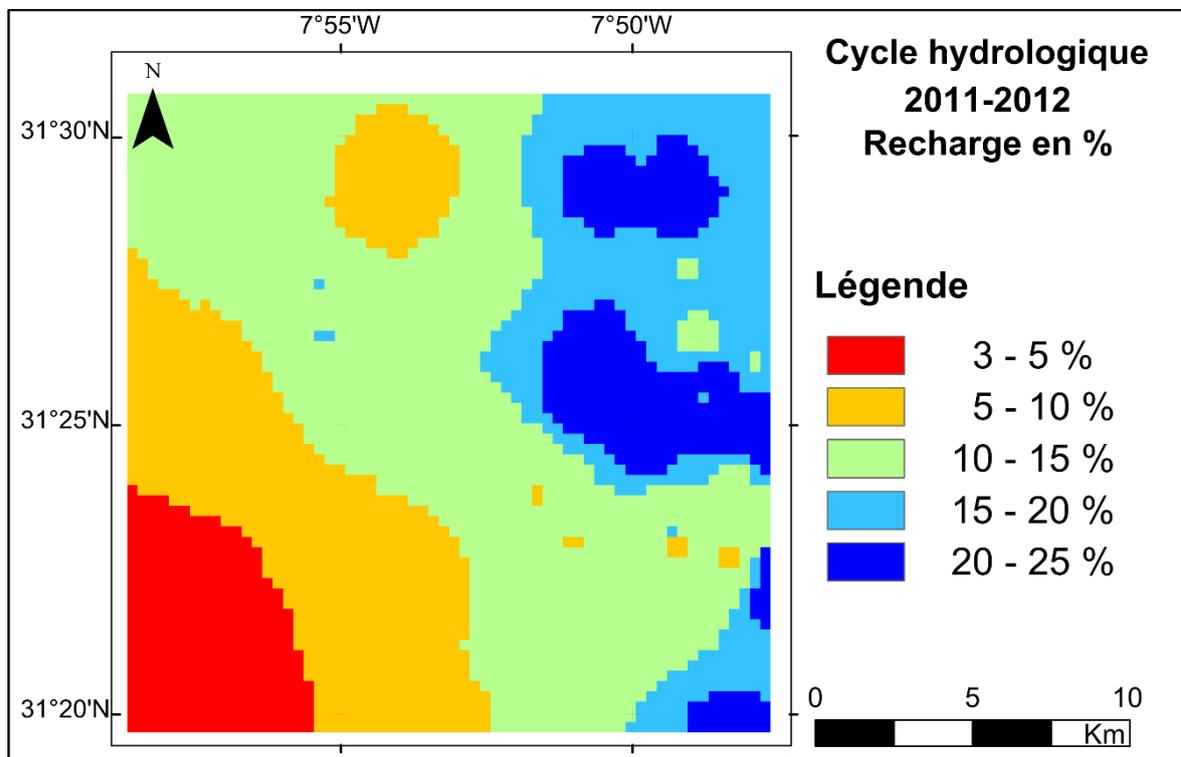


Figure 29 : Carte de distribution de la recharge spatialisée (en %) du Haouz Central de l'année hydrologique 2011–2012.

4. DISCUSSION

Le choix de la zone d'étude répond à différents critères : il n'y a aucune activité volcanique ni intrusion marine, pas de secteur industriel ni de rejet urbain ou décharge afin d'éliminer toute interaction. Sont également écartées les terres agricoles susceptibles d'apporter un bruit dû au retour d'eau d'irrigation ou aux engrais chimiques ou pesticides. Cette étude a donc concerné une zone quasiment vierge, à l'exception de quelques groupements ruraux de population très réduite vivant de l'élevage d'ovins.

La distance minimale entre la côte atlantique et les puits échantillonnés est 200 km. L'altitude varie quant à elle entre 683 et 1 358 m. Dès lors, aucune influence des eaux marines ne peut être retenue.

Le climat de la région est semi-aride. La majorité de son réseau hydrographique est à sec, sauf à la suite de pluies exceptionnelles. L'année hydrologique 2011–2012 n'a pas connu de forte pluviométrie (< 512 mm/an), d'où l'absence de crues générant une recharge concentrée au niveau du piémont du Haouz Central à travers les Oueds, lesquelles sont la seconde source d'alimentation de la nappe. Cette observation est validée par l'aspect des courbes hydroisohypses montrant un drainage généralisé dans l'ensemble de la région (Fig. 24 c). Cette carte met en évidence une sorte de parallélisme entre les lignes de courant et les axes de drainage des Oueds. Ces lignes ne sont ni divergentes, indiquant une recharge concentrée au niveau des Oueds, ni convergentes, témoignant d'une exfiltration des eaux souterraines. De ce fait, seule la recharge diffuse existe et c'est précisément sa quantification qui est l'objet de cette étude. Les dômes de recharge n'apparaissent que s'il y a d'énormes crues (Ait El Mekki, 2010).

97 % d'échantillons de l'eau souterraine affichent une concentration inférieure à 300 mg L⁻¹, résultat logique pour des eaux phréatiques de cette région. Par contre, deux échantillons dépassant ce seuil ont respectivement 321 et 360 mg L⁻¹. Les deux puits sont situés à l'extrême sud-ouest de la région où le contexte ne favorise pas l'infiltration. Par la suite, une grande partie de la pluie s'évapore et l'eau restante accède difficilement à la nappe avec une concentration en chlorures plus importante. L'eau souterraine de cette partie est donc plus concentrée que celles des autres régions. Ces conditions seront discutées par la suite.

Selon les travaux de Wood (2014), la CMB n'est une méthode efficace à l'estimation de la recharge régionale qu'à la condition d'opérer en aquifère homogène et isotrope. Le SIG permet de l'appliquer même à un aquifère hétérogène grâce à la spatialisation des différents paramètres.

L'interpolation des différentes variables a transformé les variables ponctuelles en composantes spatiales sous format Raster. Chaque pixel de ces Rasters ayant ses propres valeurs. Le calcul devient

ainsi possible et chaque pixel présentera un taux de recharge ponctuel. L'ensemble élaborera une carte de la recharge régionale.

La carte de la recharge révèle un passage de l'est vers l'ouest. *A priori*, ce passage illustre des comportements très différents entre les trois sous bassins : Issil est un passage transitoire entre l'Ourika et la Rheraya. Le long de ce sous bassin, la recharge conserve une valeur comprise entre 40 et 50 mm/an (10–15 %). Tandis que la Rheraya, situé à l'est présente des taux de recharge très faibles inférieurs à 20 mm/an au sud, augmentant vers le nord jusqu'à 30 à 40 mm/an (10–15 %). L'Ourika subit une infiltration intense de 40 à 100 mm/an (10–25 %) : la plus grande partie de son sous bassin a un taux de recharge supérieur à 80 mm/an (> 20 %).

La distribution du taux de recharge résulte de plusieurs paramètres : nature lithologique, gradient de la pente, densité de drainage, fracturation, occupation du sol, nature pédologique et précipitation.

La nature lithologique est un facteur agissant directement sur la perméabilité et donc l'infiltration. Sur les trois bassins, la géologie est variable (Dauteloup, 1958a; Piqué *et al.*, 2007), la Rheraya est peu perméable par rapport au reste de la région : formations gréseuses continentales du Permo-Trias, du Sénonien à faciès continental à composition marno-calcaires, beaucoup d'affleurements rocheux ferromagnésiens atlasiques quasiment imperméables. L'Ourika, dans le périmètre étudié, constitué de formations d'Éocène moyen, Miocène continental, reste très dominé par des formations du Quaternaire moyen et ancien et des formations modernes très perméables ; au nord les roches conglomératiques béchiques, d'épaisseur allant jusqu'à 80 m, favorisent l'infiltration. En outre, les sols châ-tains très friables, qui recouvrent la presque totalité du bassin, favorisent la recharge. En dehors de la nature lithologique et pédologique, les linéaments correspondent aux zones de failles et de fractures avec porosité secondaire et perméabilité élevées : ce point est très important, car il favorise le cheminement vers l'aquifère. L'existence de fractures orientées NE-SW en aval dans ce bassin joue en faveur de la recharge puisqu'elles sont perpendiculaires au sens d'écoulement de la pluie ruisselant du Haut Atlas vers les sous-bassins adjacents.

5. CONCLUSION

La conception d'une carte du taux de recharge pour l'année hydrologique 2011–2012 des trois sous bassins du Haouz Central a révélé trois catégories, à savoir une zone à potentiel très faible inférieur à 20 mm/an, une zone à faible recharge entre 30 et 50 mm/an et une zone à moyenne recharge allant de 50 à 100 mm/an. La carte du taux de recharge sur un périmètre de 200 km² constitue un outil très important pour l'évaluation des modèles déjà établis ou en cours de conception par des méthodes empiriques sur de larges zones comme celui conçu pour le Haouz par Ait El Mekki et Laf-touhi (2016b) qui couvre 6 200 km² avec une largeur moyenne de l'ordre de 40 km orientée N-S et une longueur moyenne de 150 km d'une direction E-W. Le calcul de la recharge, par CMB, pour une zone très vaste reste délicat eu égard au bruit de chlorure dû aux activités humaines. Par contre, les méthodes empiriques restent utilisables. La validation des modèles empiriques applicables à de vastes étendues est obligatoire, car ces modèles apportent une aide à la décision. Cette validation passe par une méthode directe s'appuyant sur des prospections et des campagnes de terrains ainsi que des analyses chimiques.

**CHAPITRE 5. ÉVALUATION DU MODÈLE
EMPIRIQUE PAR BILAN DE CHLORURES
ET APPLICATION SUR 45 ANS**

RÉSUMÉ

Les modèles empiriques sont un outil puissant dans le domaine de l'environnement, en particulier dans les zones arides ou semi-arides où les bassins sont larges avec une ressource en eau rare et souvent mal gérée avec surexploitation du fait de la demande agricole, croissante urbaine, industrielle et touristique.

Le modèle conçu dans le cadre de ce travail par Ait El Mekki et Laftouhi (2016b) détermine la recharge potentielle des aquifères par une analyse multicritère qui englobe les facteurs majeurs et mineurs de l'infiltration. Il repose sur un Système d'Information Géographique, appuyé par des techniques de télédétection, qui calcule des couches de données thématiques. Les résultats étant empiriques, cette étude se propose d'évaluer le modèle par une méthode statistique : MAE, MSE, RMSE, R^2 et MAPE. Ces formules utilisent des résultats de référence obtenus par la CMB, appliquée au Haouz par Ait El Mekki *et al.*, (2015), méthode directe et pertinente.

Après validation, le modèle est appliqué sur le Haouz sur une période de 45 ans pour déterminer la recharge spatialisée, obtenir une série temporelle utilisée pour déterminer les cycles de recharge du Haouz Central par la méthode des ondelettes continues et définir la relation qui lie l'intensité de la pluviométrie et les quantités d'eau infiltrées.

Les calculs montrent un faible écart entre données empiriques et résultats de référence : inférieur à 15,5 %. Et une périodicité annuelle de la recharge de la nappe du Haouz.

Mots clés : Recharge des aquifères ; Évaluation du modèle empirique ; MAE ; RMSE ; MSE ; R^2 ; MAPE ; Ondelettes continues ; Série temporelle ; Cycle de recharge ; Plaine du Haouz (Maroc).

1. INTRODUCTION

Les environnements arides sont extrêmement divers par leurs formes de terrain, leurs sols, leur faune, leur flore, leurs équilibres hydriques et les activités humaines qui s'y manifestent. Du fait de cette diversité, une définition pratique ne peut pas être donnée aux environnements arides. Cependant, l'élément commun à toutes les régions arides est l'aridité. Elle peut s'exprimer généralement en fonction des précipitations et de la température. Cet indice permet de définir trois types de zones arides : hyper-aride, aride et semi-aride. Sur la superficie totale des terres mondiales, la zone hyper-aride couvre 4,2 %, la zone aride 14,6 % et la zone semi-aride 12,2 %. Ainsi, près d'un tiers de la superficie totale du monde est constituée de terres arides (FAO, 1992). Caractérisées par une température variant entre 5 et 45 °C, les zones arides à semi-arides ont qu'une seule ressource hydrique dont le renouvellement est très restreint. L'accroissement économique se manifestant par l'industrie minière, l'agriculture moderne ainsi que le tourisme contribue à la détérioration de cette ressource vitale. De nouvelles zones industrielles et urbaines se développent dans la plaine du Haouz sans oublier l'immense extension des terrains agricoles irrigués. L'approvisionnement en eau a soumis l'eau souterraine à une intense dégradation, quantitative ainsi que qualitative : les niveaux piézométriques subissent des fluctuations instables qui renforcent l'amplitude de cette dégradation (Xu et Usher, 2006; Ait El Mekki, 2010; Margat et Gun, 2013). L'évaluation des eaux souterraines est primordiale pour une gouvernance optimale et pérenne des aquifères : les hydrogéologues exigent une information exacte et détaillée sur les conditions de réalimentation et d'exploitation au niveau de chaque bassin.

Le Haouz subit un climat aride à semi-aride où la pluviométrie varie en moyenne entre 100 et 500 mm/an. Pour irriguer une surface dépassant les 200 000 ha en totalité ou en partie, le seul approvisionnement existant est la nappe Mio-Plio-Quaternaire qui fournit plus de 400 millions de m³. Pendant les dernières décennies de sécheresse, le volume destiné à l'irrigation est évalué à plus de 1,30 milliard de m³/an (Abourida *et al.*, 2008; Ait El Mekki *et al.*, 2015; Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b).

Les modèles empiriques sont devenus un outil essentiel pour la gestion de diverses ressources naturelles (Johansson, 1986; Segerson *et al.*, 1986; Jose *et al.*, 1996; Harrigan, 1996; Arnold *et al.*, 1998; List et Gallet, 2001; Torvik, 2002; Holland et Sutinen, 2011; James et Aadland 2011; Ait El Mekki et Laftouhi, 2016a). En général, en géosciences et plus précisément en hydrologie et en hydrogéologie, ces modèles sont conçus pour la plupart par compilation de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographiques (SIG). La télédétection assure une distribution spatio-temporelle des observations et réduit les charges énergétiques (Murthy, 2000; Gad, 2002; Leblanc *et al.*, 2003; Tweed *et al.*, 2007). Les SIG sont devenus un outil puissant pour la gestion de diverses ressources naturelles (Helldén, 1987; Belward et Valenzuela, 1991; Welch *et al.*, 1992; Saraf et Choudhury, 1998; Solomon et Quiel, 2006; Jha et Chowdary, 2007; Münch et Conrad, 2007; Dar *et*

al., 2011; Kumar *et al.*, 2012). La combinaison du SIG et de la télédétection établit des modèles empiriques servant à la collecte des informations. Ces modèles intègrent aussi des cartes classiques, des données satellitaires et celles obtenues sur le terrain (Krishnamurthy *et al.*, 1996; Tiwari et Rai, 1996; Das *et al.*, 1997; Thomas *et al.*, 1999; Harinarayanan *et al.*, 2000; Muralidhar *et al.*, 2000; Leblanc *et al.*, 2003; Servat *et al.*, 2003; Sener *et al.*, 2005; Shaban *et al.*, 2006; Leblanc *et al.*, 2007; Chowdhury *et al.*, 2010; Machiwal *et al.*, 2011; Magesh *et al.*, 2012; Mukherjee *et al.*, 2012; Khodaei et Nassery, 2013). De plus en plus de spécialistes utilisent ces modèles, mais, selon les objectifs, les méthodologies varient.

Un modèle empirique a été conçu par Ait El Mekki et Laftouhi (2016b), estimant la recharge potentielle sur des milliers de km² dans les milieux arides à semi-arides en identifiant les facteurs agissant sur la recharge des aquifères. Ce modèle regroupe sept paramètres : la lithologie, la pente, la densité de drainage, l'occupation du sol et le couvert végétal, les linéaments, la nature du sol et l'intensité des précipitations. L'étude, qui a concerné la plaine du Haouz, est basée sur la création d'un SIG optimisé intégré avec la télédétection. Ce couplage permet d'effectuer une analyse multicritère spatialisée reposant sur le choix des paramètres régissant l'infiltration directe des précipitations, leur degré d'influence et leurs relations éventuelles. Chaque paramètre est d'abord étudié indépendamment puis tous les facteurs sont intégrés et compilés pour concevoir le modèle empirique servant au calcul du taux de recharge potentielle.

Ce chapitre a pour objectif d'évaluer ce modèle empirique à l'aide des résultats obtenus par la méthode du bilan en chlorure (CMB) ; méthode hydrochimique basée sur des mesures effectuées sur le terrain. La comparaison entre résultats empiriques et résultats de référence a été faite par une méthode statistique. Il s'agit de : Erreur Absolue Moyenne (MAE) (Coyle et Lin, 1988; Dougherty et Loce, 1993; Willmott et Matsuura, 2005), Erreur Quadratique Moyenne (RMSE) (Willmott, 1982; Faber, 1999; Chai et Draxler, 2014), Erreur Moyenne Quadratique (MSE) (Allen, 1971; Ephraïm et Malah, 1984; Gilroy *et al.*, 1990; Guo *et al.*, 2005), Coefficient de Détermination (R²) (Shepherd, 1989; Nathan et McMahon, 1990; Mohseni *et al.*, 1998; Moriasi *et al.*, 2007) et Pourcentage Moyen d'Erreur Absolue (MAPE) (Gyasi-Agyei *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 2009). Une marge d'erreur satisfaisante inférieure à 15,5 % a été obtenue, une étude temporelle mettant en évidence la bonne corrélation qui existe entre les résultats empiriques et les résultats de référence.

Après validation, le modèle a été utilisé sur une période de 45 ans (1967–2012) pour étudier la variation spatio-temporelle de la recharge et déterminer les cycles de recharge par la méthode des ondes continues ; très sollicitée dans les études de séries temporelles et de cycles hydrologiques (Kumar et Foufoula-Georgiou, 1997; Smith *et al.*, 1998; Labat *et al.*, 2000; Slimani *et al.*, 2009; Laignel *et al.*, 2010; Massei *et al.*, 2010; Fritier *et al.*, 2012). Les séries temporelles permettent de déterminer les cycles de la recharge et de définir les années sèches et humides *via* la variable centrée-

réduite, très utilisée dans les études similaires (Gustard, 1997; Lanen et Demuth, 2002) ainsi que sa moyenne mobile (Chang *et al.* , 1984; Hosking, 1984; Swift Jr *et al.* , 1988; Samoradnitsky et Taqqu, 1994). Dans le cas du Haouz, la série temporelle extraite a permis aussi d'établir l'influence de l'intensité de la pluie sur la quantité des eaux infiltrées où la variabilité de la recharge se synchronise avec celle de la pluie.

La précision du modèle a une grande importance puisque ce dernier estime la recharge régionale annuelle à faible coût et peut être utilisé comme un outil d'aide à la décision dans la planification de futurs projets de recharge artificielle.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude décrivant le Haouz a été déjà traitée par les chapitres qui précèdent : 1, 3 et 4.

2.2. Méthodologie

Ait El Mekki et Laftouhi (2016b) ont conçu un modèle empirique servant à estimer la recharge régionale des aquifères dans les milieux arides et semi-arides. Le développement de ce modèle s'est bâti sur le croisement de l'information spatiale des sept facteurs régissant la recharge des aquifères, à savoir la lithologie, la pente, la densité de drainage, la densité des linéaments, l'occupation du sol et le couvert végétal, la pédologie et l'intensité des précipitations.

Ce chapitre calcule les données estimées par le modèle en les comparant avec les résultats obtenus par CMB. Après cette évaluation, l'exécution du modèle vient par la suite sur une période de 45 ans (1967–2012).

2.2.1. Rappel du modèle empirique

Le modèle empirique a permis la définition des zones de recharge et en évaluer le potentiel. Il est basé sur la création d'un SIG optimisé intégré avec la télédétection. Ce couplage permet d'effectuer une analyse multicritère spatialisée reposant sur le choix des paramètres régissant l'infiltration directe des précipitations, leur degré d'influence et leurs relations éventuelles. La lithologie, l'occupation du sol, le couvert végétal, densité de drainage, la pente, le sol, les linéaments et les précipitations sont les sept facteurs influençant la recharge des aquifères. Chaque paramètre a été d'abord étudié indépendamment puis tous les facteurs sont intégrés et compilés pour déduire une carte synthétique de la recharge potentielle (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016a; Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b).

2.2.2. Bilan de chlorure (CMB)

La CMB est une méthode hydrochimique développée par Eriksson et Khunakasem (1969), est décrite par plusieurs auteurs (Eriksson, 1981; Dettinger, 1989; Wood et Sanford, 1995; Bazuhair et Wood, 1996; Wood, 1999; Subyani, 2004; Gee *et al.*, 2005; Somaratne et Smettem, 2014; Ait El Mekki *et al.*, 2015). Cette méthode a trouvé beaucoup de succès chez plusieurs auteurs et elle est appliquée presque dans tous les continents : Afrique (Edmunds *et al.*, 1988; Takounjou *et al.*, 2010; Diouf *et al.*, 2013), en Asie (Ting *et al.*, 1998; Subyani, 2004; Liu *et al.*, 2009; Marei *et al.*, 2010; Huang et Pang, 2010), en Europe (Lo Russo *et al.*, 2003; Alcalá et Custodio, 2014), en Australie (Allison et Hughes, 1978; Guan *et al.*, 2009) et en Amérique (Sophocleous, 1991; Scanlon, 1991; Murphy *et al.*, 1996; Nolan *et al.*, 2007). Cette méthode est utilisable pour la zone saturée et la zone

non saturée (Edmunds *et al.*, 2002), elle est appliquée dans divers climats : aride (Gee et Hillel, 1988; Fouty, 1989), semi-aride (Wood *et al.*, 1997; Subyani et Şen, 2006) et humide (Saghravani *et al.*, 2014). Cette approche a été utilisée pour la première fois au Maroc par Ait El Mekki *et al.*, (2015), dont les résultats ont servi à évaluer le modèle empirique traité au cours de cette étude. Beaucoup de chercheurs ont apprécié l'exactitude de cette méthode (Somaratne et Smettem, 2014). Ainsi, les résultats de la recharge du Haouz obtenus par cette approche ont été considérés comme des résultats de référence.

Le principe de cette approche hydrochimique repose sur le fait que la seule source de chlorures dans la zone non saturée provient des précipitations. La concentration augmente dans le sol jusqu'à atteindre l'aquifère puisque la plupart des plantes n'en consomment pas. Le taux de recharge décroît donc avec la concentration en chlorure : plus sa concentration dans le sol est élevée, plus le taux de recharge est faible (Ait El Mekki *et al.*, 2015).

2.2.3. Validation du modèle

Le modèle a été validé par comparaison de ses prédictions avec les résultats obtenus par CMB pendant l'année hydrologique 2011–2012 (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016a). L'incertitude du modèle est déduite. La validation s'est appuyée sur 40 points d'observation étalés sur 200 km² au piémont du Haouz où règnent les conditions les plus favorables à l'application de la CMB, *i.e.* que les eaux souterraines ne contiennent aucun apport en chlorure naturel hors précipitations, qu'il n'y a aucune contamination par eaux marines ou par activité volcanique et qu'aucune activité industrielle, minière, de tourisme ou urbanisme polluant n'est enregistrée (Ait El Mekki *et al.*, 2015).

2.2.3.1. Estimation de la précision

La précision du modèle a été établie par un ensemble de relations statistiques (Willmott *et al.*, 1985; Hyndman et Koehler, 2006). Ces formules sont : Erreur Absolue Moyenne (MAE) (Coyle et Lin, 1988; Dougherty et Loce, 1993; Willmott et Matsuura, 2005), Erreur Quadratique Moyenne (RMSE) (Willmott, 1982; Faber, 1999; Chai et Draxler, 2014), Erreur Moyenne Quadratique (MSE) (Allen, 1971; Ephraïm et Malah, 1984; Gilroy *et al.*, 1990; Guo *et al.*, 2005), Coefficient de Détermination (R^2) (Shepherd, 1989; Nathan et McMahon, 1990; Mohseni *et al.*, 1998; Moriasi *et al.*, 2007) et Pourcentage Moyen d'Erreur Absolue (MAPE) (Gyasi-Agyei *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 2009).

Les formules d'estimation de l'erreur sont traitées par Excel[®], de même que tous les graphiques. Microsoft Excel est un logiciel tableur de la suite bureautique Microsoft Office[®].

2.2.3.1.1. Erreur Absolue Moyenne (MAE)

L'erreur absolue moyenne connue par *Mean Absolute Error* (MAE). La MAE est une moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts. Elle est calculée par l'Équation 12 :

$$\text{Équation 12} \quad MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|$$

Où :

- $|e_i| = |x_i - \bar{x}|$;
- n : nombre total des valeurs de référence ;
- x_i : valeur de la recharge potentielle estimée ;
- \bar{x} : valeur moyenne de la recharge mesurée par la CMB.

2.2.3.1.2. Erreur Quadratique Moyenne (RMSE)

La RMSE. Elle est la racine carrée de *Mean Squared Error* (MSE). La RMSE est une estimation de l'erreur moyenne entre la valeur empirique et la valeur de référence. Elle est calculée par l'Équation 13 :

$$\text{Équation 13} \quad RMSE(\hat{\theta}) = \sqrt{MSE(\hat{\theta})} = \sqrt{E((\hat{\theta}) - (\theta))^2}$$

Où :

- $\hat{\theta}$: valeur de la recharge potentielle estimée ;
- θ : valeur de la recharge mesurée par la CMB.

2.2.3.1.3. Moyenne Quadratique des Erreurs (MSE)

La moyenne quadratique des erreurs connue par *Mean Squared Error* (MSE) nommée aussi *Mean Squared Deviation* (MSD). Elle est une estimation de l'erreur moyenne (Équation 14) :

$$\text{Équation 14} \quad MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y)^2$$

- n : nombre total des valeurs de référence ;
- \hat{y}_i : valeur de la recharge potentielle estimée ;
- y : valeur de la recharge mesurée par la CMB.

2.2.3.1.4. Coefficient de Détermination (R^2)

Ce coefficient mesure la proportion de la variable \hat{y}_i (valeur empirique) qui s'explique par les variations de la variable y_i (valeur de référence) ; plus il est proche de 1 plus la différence est faible. Il est calculé par l'Équation 15 :

$$\text{Équation 15} \quad R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Où :

- n : nombre total des valeurs de référence ;
- \hat{y}_i : valeur moyenne de la recharge potentielle estimée ;
- y_i : valeur de la recharge mesurée par la CMB ;
- \bar{y} : moyenne des mesures.

2.2.3.1.5. Pourcentage Moyen de l'Erreur Absolue (MAPE)

C'est une moyenne des modules des écarts relatifs par rapport aux valeurs de référence.

$$\text{Équation 16} \quad MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - E_t}{E_i} \right|$$

Où :

- n : nombre total des valeurs de référence ;
- E_t : valeur de la recharge potentielle estimée ;
- E_i : valeur de la recharge mesurée par la CMB.

2.2.3.1.6. Corrélation linéaire entre recharge calculée et recharge de référence

Un diagramme illustrant la corrélation linéaire entre la recharge empirique et la recharge de référence a été dressé. Il dévoile aussi la courbe de tendance en affichant son équation et son R^2 .

2.2.3.2. Valeurs utilisées

2.2.3.2.1. Valeurs calculées

Les valeurs prédictives sont obtenues par utilisation du modèle (Fig. 30) sur l'année hydrologique 2011–2012. La précipitation étant la seule variable (intrans) du modèle, son obtention est explicitée ci-dessous.

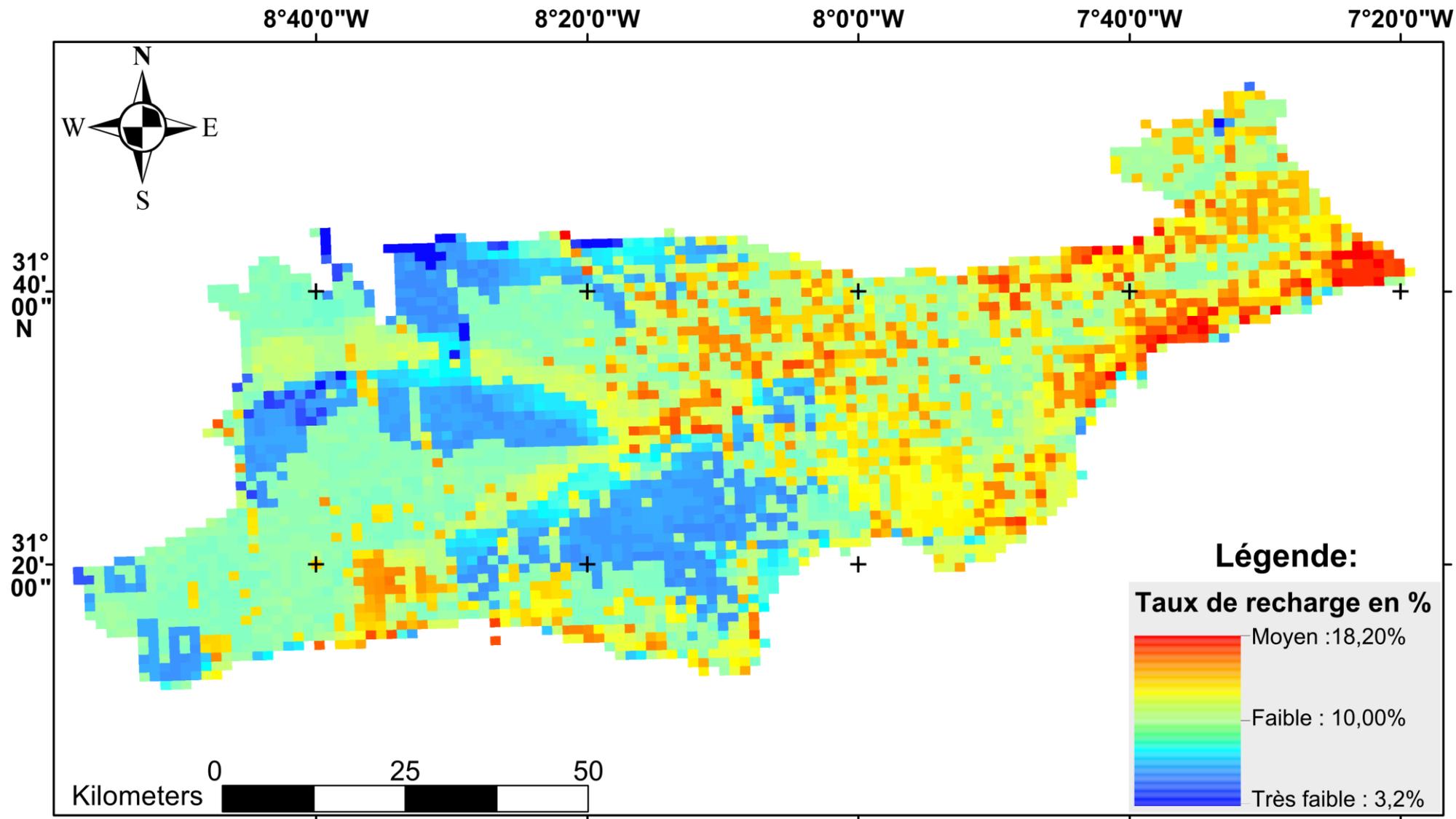


Figure 30 : Carte du potentiel de recharge du Haouz (en %) tiré du Modèle développé par Ait El Mekki et Laftouhi (2016b).

2.2.3.2.2. Valeurs de référence obtenues par la CMB

Les valeurs de référence utilisées dans ce travail ont été obtenues par Ait El Mekki *et al.*, (2015) (voir chapitre 4). Cette étude est focalisée sur 40 points répartis sur 200 km². L'analyse du chlorure a été effectuée par chromatographie ionique.

2.2.4. Utilisation du modèle

Le modèle requiert une seule entrée pour déduire la recharge potentielle qui est la précipitation efficace (en mm) sous forme de couche. Chaque année hydrologique correspond à une couche de précipitation.

2.2.4.1. Précipitations

La carte des précipitations a été préparée en utilisant les données ponctuelles, sur une période de 45 ans (1967–2012) (ABHT), recueillies par 12 stations pluviométriques de la région il s'agit de : Marrakech, Tahanaout, Agbalou, Sidi Rahal, Tafériat, Imine El Hammam, Barrage Lalla Takerkoust, Sidi Hssain, Sidi Bouothmane, Chichaoua et Abadla (Fig. 11). Ces données, interpolées par l'inverse de la distance pondérée (IDW) (Philip et Watson, 1982; Watson et Philip, 1985; Childs, 2004; Yang *et al.*, 2007), ont donné la distribution des précipitations.

2.2.5. Répartition spatio-temporelle

L'étude spatiale a été réalisée pour tout le Haouz, soit environ 6 200 km². Chaque année hydrologique a été traitée à part. L'étude chronologique concerne le piémont du Haouz Central qui englobe la Rharaya et l'Ourika, soit un bassin de 200 km².

2.2.5.1. Répartition spatiale

Après utilisation du modèle, 45 cartes ont été produites, chacune correspondant à une année hydrologique avec une spatialisation annuelle de la recharge du Haouz à l'aide de laquelle une série temporelle de 45 ans a été obtenue. Pour obtenir une série avec un pas mensuel, l'entrée annuelle de pluviométrie est substituée en une série d'entrées mensuelles.

2.2.5.2. Répartition temporelle

L'étude temporelle détermine les cycles de recharge par la méthode des ondelettes continues (série temporelle de 45 ans avec un pas mensuel).

2.2.5.3. Détermination des cycles de recharge du piémont du Haouz Central

La série temporelle de la recharge de 45 ans allant de 1967 jusqu'à 2012, avec un pas mensuel, a été la base pour identifier les cycles de la recharge du piémont Haouz Central. L'étude a concerné les deux sous bassins Rheraya et Ourika, chacun séparément. La méthode adoptée pour cette démarche était les ondelettes continues.

2.2.5.3.1. Définition des ondelettes

Une ondelette donnée est définie mathématiquement par :

« Une ondelette est une fonction à la base de la décomposition en ondelettes, décomposition similaire à la transformée de Fourier à court terme, utilisée dans le traitement du signal. Elle correspond à l'idée intuitive d'une fonction correspondant à une petite oscillation, d'où son nom.

En mathématiques, une ondelette Ψ est une fonction de carré sommable de l'espace de Hilbert $L^2(\mathbb{R})$ le plus souvent oscillante et de moyenne nulle, choisie comme outil d'analyse et de reconstruction multi-échelle. Les ondelettes se rencontrent généralement par familles, constituées d'une ondelette mère et de l'ensemble de ses images par les éléments d'un sous-groupe Λ du groupe des transformations affines de \mathbb{R}^n .

On définit ainsi une famille $\varphi_{s,\tau}$ (où $(s, \tau) \in \mathbb{R}^{+*} \times \mathbb{R}$) d'ondelettes à partir de l'ondelette mère Ψ :

$$\text{Équation 17} \quad \forall t \in \mathbb{R}, \varphi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$$

Par extension, des familles de fonctions sur des sous-variétés de \mathbb{R}^n invariantes par un groupe de transformation localement isomorphe au groupe affine peuvent également être qualifiées de familles d'ondelettes. » (Wikipédia).

2.2.5.3.2. Transformée en ondelettes continues et discrètes

Il existe deux types de transformées en ondelettes suivant que le sous-groupe Λ est discret ou continu.

Dans ce travail, c'est la méthode des ondelettes continues qui a été utilisée.

2.2.5.3.3. Logiciels utilisés

Le logiciel R propose aux utilisateurs un langage et un environnement *open source* pour les calculs statistiques et graphiques. La version du logiciel utilisée est 2.10.1 pour le traitement de signal hydrologique. La distribution des valeurs requises pour les traitements sous R ainsi que le format des fichiers sous l'extension *.txt ont été préparés sous Excel.

2.2.5.3.4. Traitement du signal

Le traitement du signal a été effectué en utilisant le code illustré Fig. 31. La recharge des sous bassins de la Rheraya et l'Ourika a été extraite mensuellement.

```

Ouvrir R puis exécuter :

library(sowas)
Outp <- readts(file.choose())
y1 <- ts(Outp,start=1967,end=2012,deltat=1/12)

(Pour définir SPECTRUM WAVELETS) :

wsp.y <- wsp(y1,s0=0.2,noctave=5,nvoice=100,sw=0.3,w0=2*pi,
logscale=T,nreal=0,siglevel=0.9,arealsiglevel=0,sigplot=1,
units="years",color=T,plot=T,device="screen",file="",labsc=1)

```

Figure 31 : Code utilisé pour déduire le spectre d'ondelettes de la recharge par le logiciel R.

2.2.6. Relation pluie-recharge

Dans cette partie, l'étude a considéré le Haouz avec ses trois composantes : l'Oriental, le Central et l'Occidental, comme un point dans l'espace, où la pluviométrie annuelle est la moyenne des 12 stations météorologiques disponibles. Cette partie discute l'hypothèse de l'identification des années sèches et humides en utilisant la recharge à la place de la pluie par utilisation de la variable centrée-réduite et sa moyenne mobile.

2.2.6.1. Détermination des années sèches et humides

La détermination des années sèches et humides du Haouz, par la série chronologique de 45 ans, repose sur la variable centrée-réduite portée sur un graphique en histogramme avec sa moyenne mobile en courbe. Les paramètres pluie et recharge ont été utilisés afin de vérifier si les deux aboutissent au même résultat.

2.2.6.1.1. Variable centrée-réduite

La variable centrée-réduite (z) est une variable aléatoire dont les valeurs ont été modifiées afin de fixer sa moyenne et sa variance. Elle est calculée par l'Équation 18.

$$\text{Équation 18} \quad z = \frac{P_i - \bar{x}}{\sigma}$$

Où :

- z : variable centrée-réduite ;
- P_i : intensité de la pluviométrie efficace pour une année hydrologique donnée (i) en mm ;
- \bar{x} : moyenne générale de la recharge de la période étudiée en mm ;
- σ : écart type en mm.

2.2.6.1.2. Moyenne mobile

La moyenne mobile, ou moyenne glissante, est utilisée pour analyser des séries ordonnées de données, le plus souvent chronologiques, en supprimant les fluctuations transitoires de façon à souligner les tendances à plus long terme.

La moyenne mobile annuelle a été calculée en utilisant 5 valeurs annuelles.

2.2.6.2. Influence de l'intensité de la pluviométrie sur la recharge

Dans cette partie, le Haouz est considéré comme une donnée ponctuelle.

Deux graphiques ont été dressés : le premier sous forme d'un diagramme affichant la pluviométrie annuelle maximale et minimale ainsi que la recharge de chaque année hydrologique, le second consignant la corrélation linéaire entre pluviométrie et recharge.

3. RÉSULTATS

3.1. Calculs pour l'année hydrologique 2011–2012

La seule entrée requise par le modèle afin de déduire la recharge d'une année hydrologique est l'intensité des précipitations spatialisées de cette dernière.

3.1.1. Détermination des précipitations

La Fig. 32 présente la répartition des précipitations de l'année hydrologique 2011–2012. Elle est déterminée par l'interpolation des pluies annuelles ponctuelles regroupées des 12 stations.

3.1.2. Détermination de la recharge empirique

Après obtention de la carte de répartition, l'utilisation du modèle permet d'obtenir la recharge (Fig. 33).

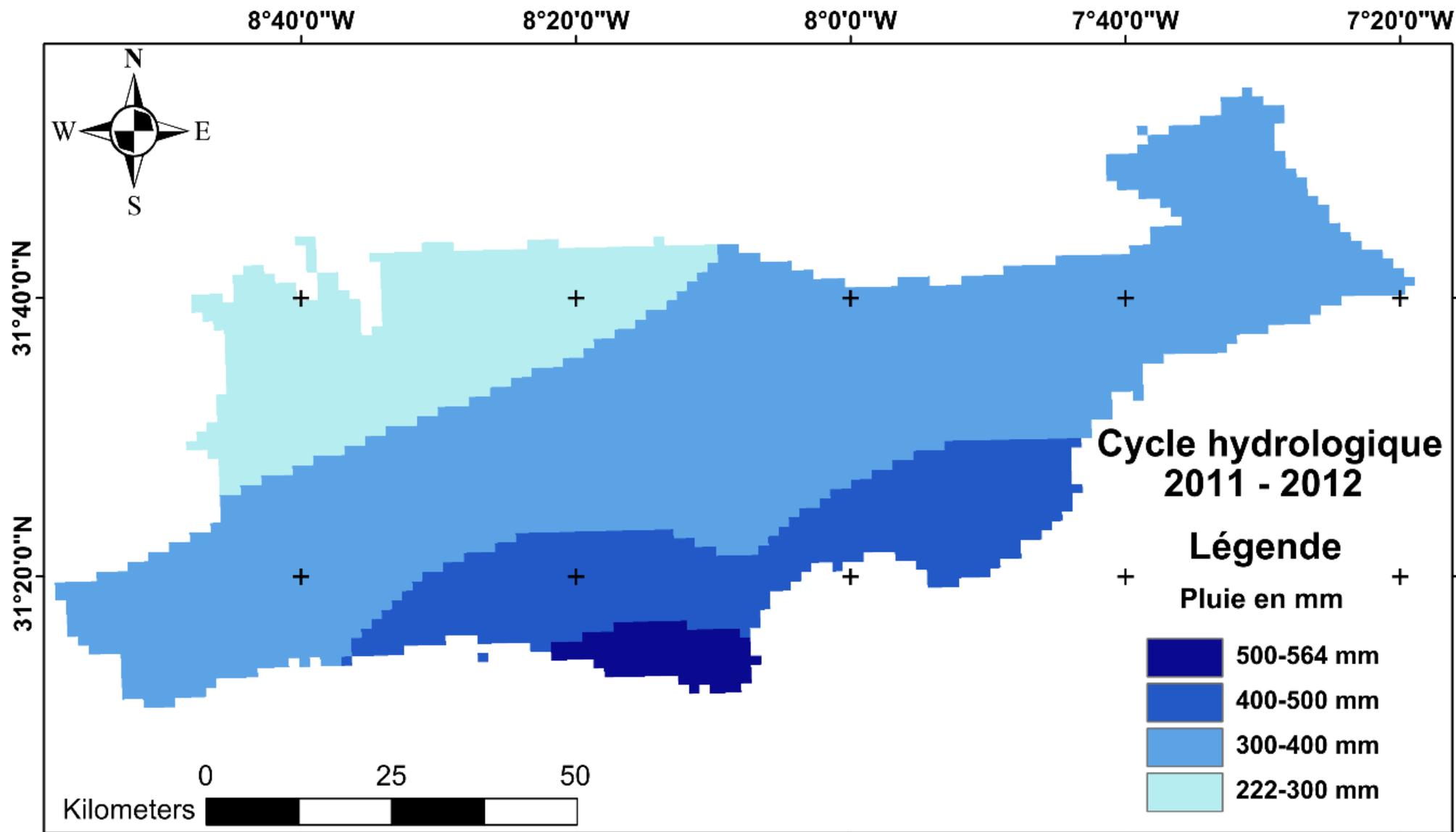


Figure 32 : Carte de répartition des précipitations pour l'année hydrologique 2011–2012.

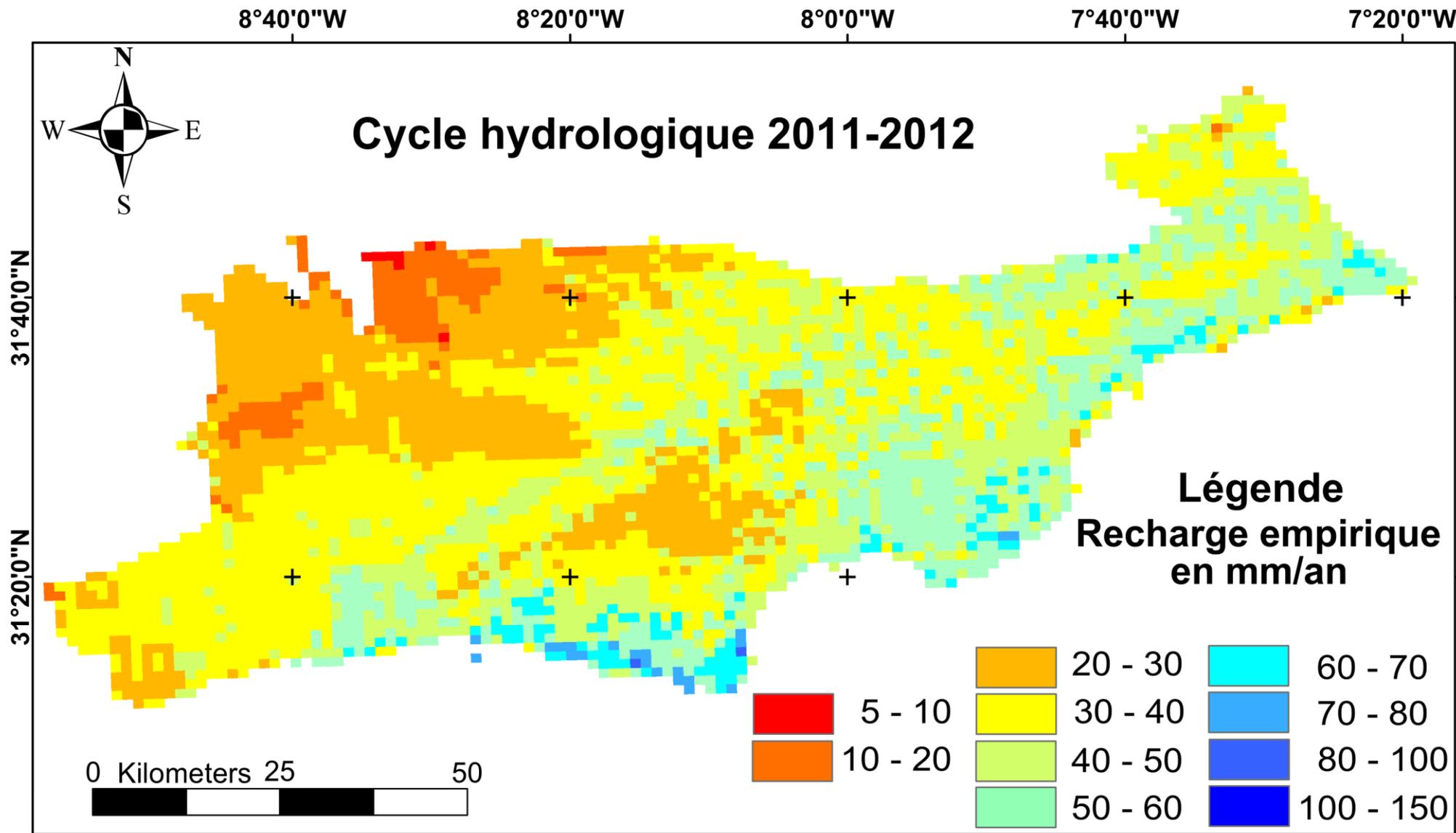


Figure 33 : Carte de répartition de la recharge empirique du Haouz de l'année 2011–2012 déduite du modèle.

3.2. Valeurs de référence obtenues par la CMB pour l'année hydrologique 2011–2012

Les valeurs de référence proviennent de l'étude établie par Ait El Mekki *et al.*, (2015) qui a concernée le piémont du Haouz Central de l'année hydrologique 2011–2012. 40 valeurs de référence ont été reprises de l'étude citée. Ces 40 points d'observation sont répartis sur 200 km² (tableau 14).

3.3. Valeurs obtenues par le modèle

Les valeurs de la recharge sont extraites des résultats obtenus dans la Fig. 33. Le tableau 14 illustre les valeurs empiriques prises.

3.4. Estimation de la précision du modèle

La précision a été calculée par les relations statistiques déjà explicitées (tableau 14 et Fig. 34). La Fig. 35 illustre la corrélation linéaire entre recharge calculée et recharge mesurée.

La série des formules statistiques utilisées et le résultat obtenu de chacune sont :

- Erreur absolue moyenne (MAE) = **5,44 mm/an**;
- Erreur quadratique moyenne (RMSE) = **40,92 mm/an** ;
- Moyenne quadratique des erreurs (MSE) = **6,39 mm/an** ;
- Coefficient de détermination (R²) = **0,88** ;
- Pourcentage moyen de l'erreur absolue (MAPE) = **15,48%**.

Tableau 14 : Détermination de la précision du modèle développé par Ait El Mekki et Laftouhi (2016b).

No.	Longitude (°)*	Latitude (°)*	Recharge référence 2011–2012 mm/an	Recharge empirique 2011–2012 mm/an	Écart mm/an	Écart ² mm/an	Écart mm/an	Écart / Valeur Référence
Obv01**	-7,94634	31,39724	20,803	30,423	9,619	92,532	9,619	0,462
Obv02	-7,94857	31,40911	28,462	32,463	4,001	16,010	4,001	0,141
Obv03	-7,95852	31,40847	22,103	31,463	9,360	87,618	9,360	0,423
Obv04	-7,95535	31,41432	25,460	40,463	15,003	225,089	15,003	0,589
Obv05	-7,95036	31,42009	24,867	40,727	15,860	251,535	15,860	0,638
Obv06	-7,81035	31,38225	37,675	41,212	3,537	12,512	3,537	0,094
Obv07	-7,84680	31,37844	47,036	51,795	4,760	22,653	4,760	0,101
Obv08	-7,86105	31,38063	42,950	49,104	6,154	37,869	6,154	0,143
Obv09	-7,88906	31,37440	27,031	40,079	13,048	170,252	13,048	0,483

Suite du tableau à la page suivante

Suite du tableau 14 :

No.	Longitude (°)*	Latitude (°)*	Recharge référence 2011–2012 mm/an	Recharge empirique 2011–2012 mm/an	Écart mm/an	Écart ² mm/an	Écart mm/an	Écart / Valeur Référence
Obv10**	-7,84115	31,38212	38,152	43,617	5,465	29,861	5,465	0,143
Obv11	-7,85140	31,39612	38,191	43,104	4,913	24,133	4,913	0,129
Obv12	-7,85412	31,40541	44,148	47,331	3,183	10,131	3,183	0,072
Obv13	-7,86185	31,42110	49,768	44,818	-4,950	24,500	4,950	0,099
Obv14	-7,86570	31,42153	48,211	44,818	-3,393	11,514	3,393	0,070
Obv15	-7,86378	31,42747	51,092	47,818	-3,274	10,720	3,274	0,064
Obv16	-7,85838	31,43182	56,344	53,868	-2,476	6,131	2,476	0,044
Obv17	-7,86557	31,46216	42,876	47,616	4,740	22,468	4,740	0,111
Obv18	-7,89336	31,48095	21,371	29,405	8,034	64,543	8,034	0,376
Obv19	-7,94388	31,51082	39,294	42,127	2,833	8,028	2,833	0,072
Obv20	-7,81757	31,37695	43,509	50,212	6,703	44,936	6,703	0,154
Obv21	-7,92334	31,48767	38,046	44,842	6,796	46,182	6,796	0,179
Obv22	-7,94052	31,47293	37,336	40,965	3,629	13,168	3,629	0,097
Obv23	-7,94151	31,46521	37,218	42,110	4,892	23,934	4,892	0,131
Obv24	-7,92207	31,46269	42,485	46,752	4,267	18,207	4,267	0,100
Obv25	-7,81244	31,41794	77,982	69,756	-8,226	67,661	8,226	0,105
Obv26	-7,80407	31,42332	75,093	68,125	-6,968	48,550	6,968	0,093
Obv27	-7,79476	31,40147	45,134	46,979	1,845	3,405	1,845	0,041
Obv28	-7,79329	31,38787	43,291	47,448	4,157	17,282	4,157	0,096
Obv29	-7,78559	31,38334	53,069	53,448	0,379	0,144	0,379	0,007
Obv30	-7,79374	31,37682	33,417	40,925	7,508	56,367	7,508	0,225
Obv31	-7,87715	31,46463	41,931	43,376	1,445	2,087	1,445	0,034
Obv32	-7,81193	31,38467	63,346	67,012	3,666	13,439	3,666	0,058
Obv33	-7,78898	31,43396	55,885	61,369	5,484	30,079	5,484	0,098
Obv34	-7,80485	31,44003	46,434	48,803	2,370	5,615	2,370	0,051
Obv35	-7,80694	31,46126	53,653	49,480	-4,173	17,413	4,173	0,078
Obv36	-7,81889	31,49285	73,578	69,156	-4,422	19,558	4,422	0,060
Obv37	-7,90446	31,41916	48,221	53,033	4,811	23,150	4,811	0,100
Obv38	-7,90944	31,42594	47,519	53,033	5,513	30,398	5,513	0,116
Obv39	-7,91156	31,44152	53,333	48,199	-5,134	26,362	5,134	0,096
Obv40	-7,91261	31,45505	51,725	50,798	-0,927	0,859	0,927	0,018
Moyenne des écarts					3,251	1 636,895	217,919	6,193
Nombre d'observation					40			
Erreur absolue moyenne (MAE) (mm/an)					5,44			
Erreur Quadratique Moyenne (MSE) (mm/an)					40,92			
Moyenne quadratique des erreurs (RMSE) (mm/an)					6,39			
Coefficient de détermination (R²)					0,88			
Pourcentage moyen de l'erreur absolue (MAPE)					15,48%			

* Coordonnées en degrés décimaux (*Coordinates system : GCS Merchich Degree*)

** Obv. : observation

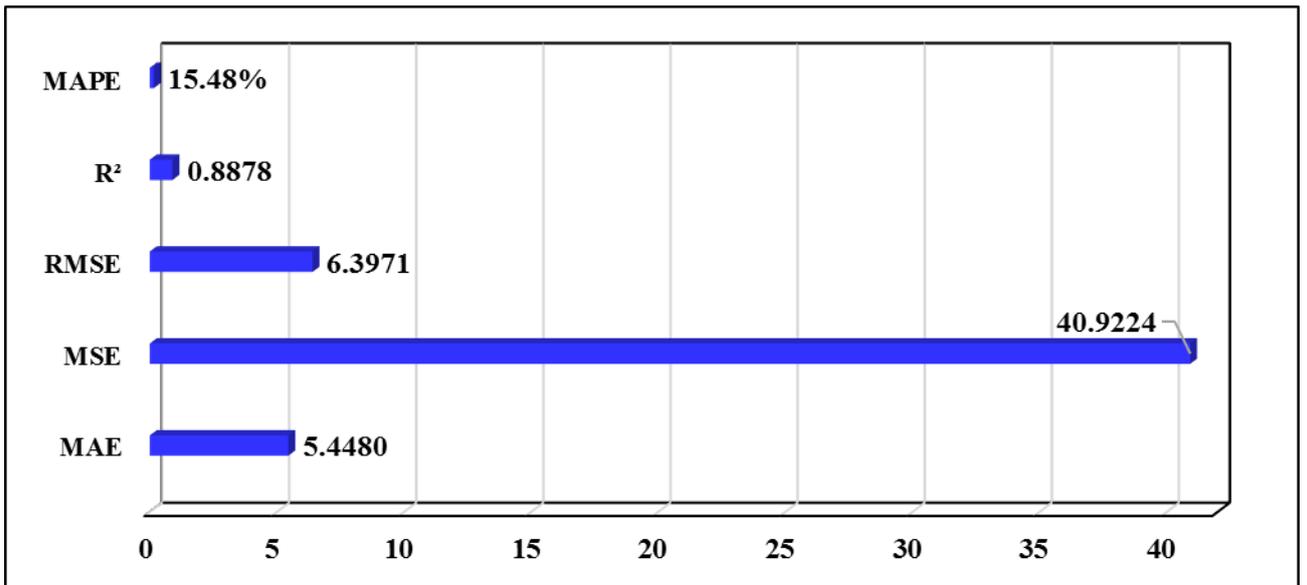


Figure 34 : Présentation des résultats des formules statistiques déterminant l'erreur du modèle empirique.

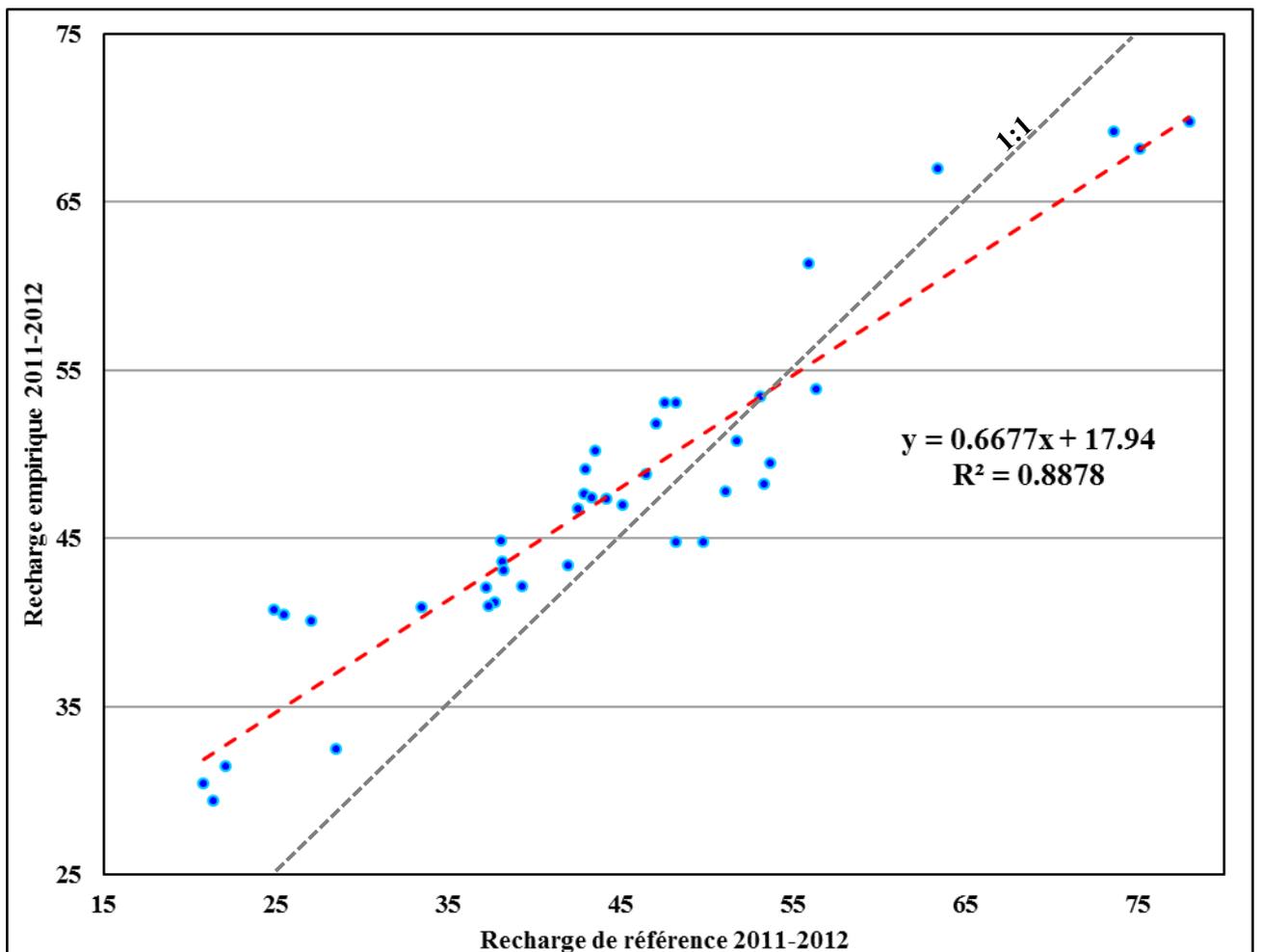
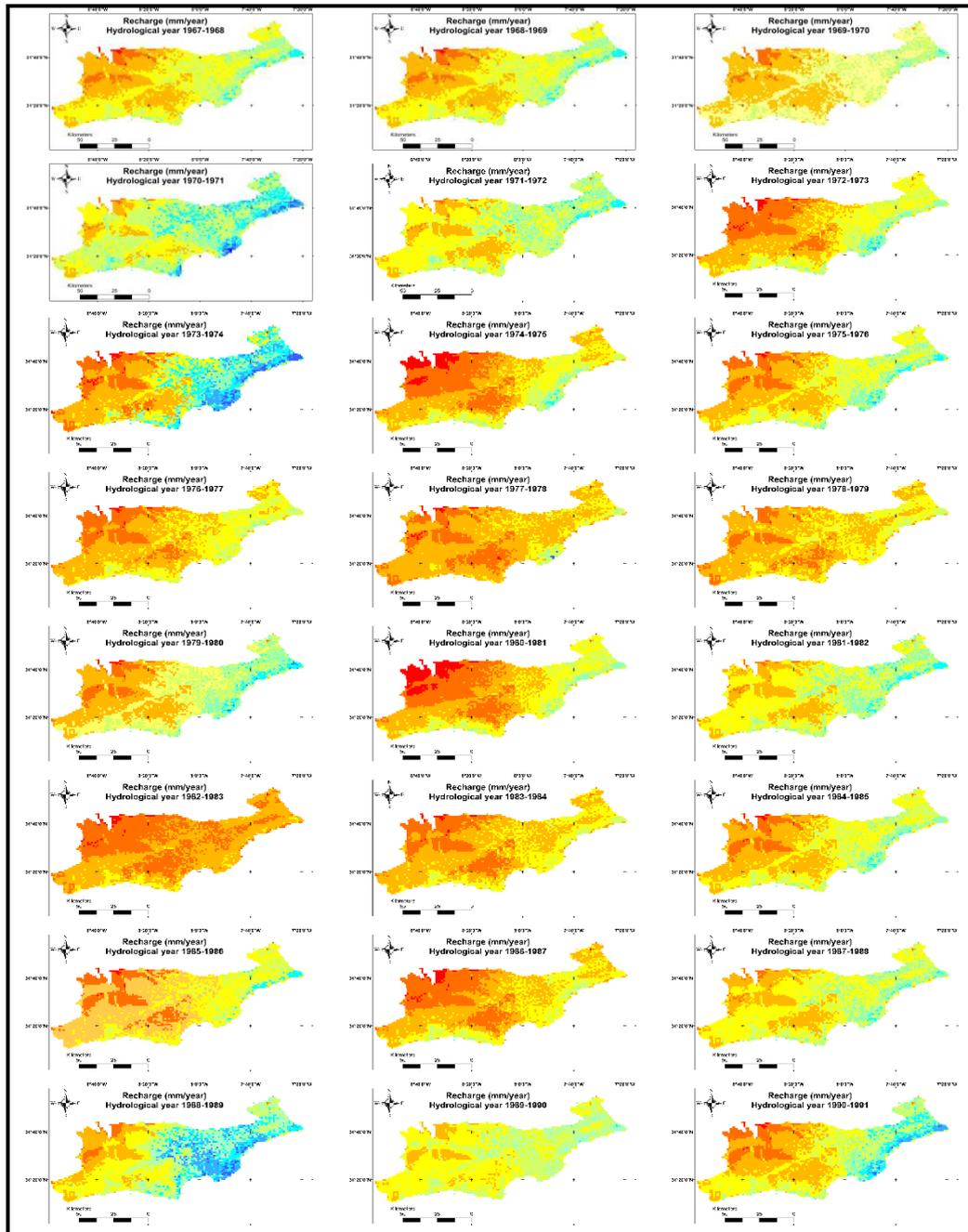


Figure 35 : Corrélation entre recharge calculée et recharge de référence.

3.5. Répartition spatio-temporelle de la recharge du Haouz

3.5.1. Répartition spatiale

La Fig. 36 a illustre la distribution sous forme de carte hydrologique annuelle. Le résultat obtenu a mis en évidence une série temporelle de 45 ans. L'année hydrologique la plus humide de cette série était 1995–1996 (Fig. 36 b) tandis que la plus sèche était 1992–1993 (Fig. 36 c). Le meilleur exemple qui sépare les cycles humides des cycles secs reste le cycle hydrologique 1984–1985 (Fig. 36 d).



Suite de la Fig. à la page suivante :

Suite de la Fig. 36 a :

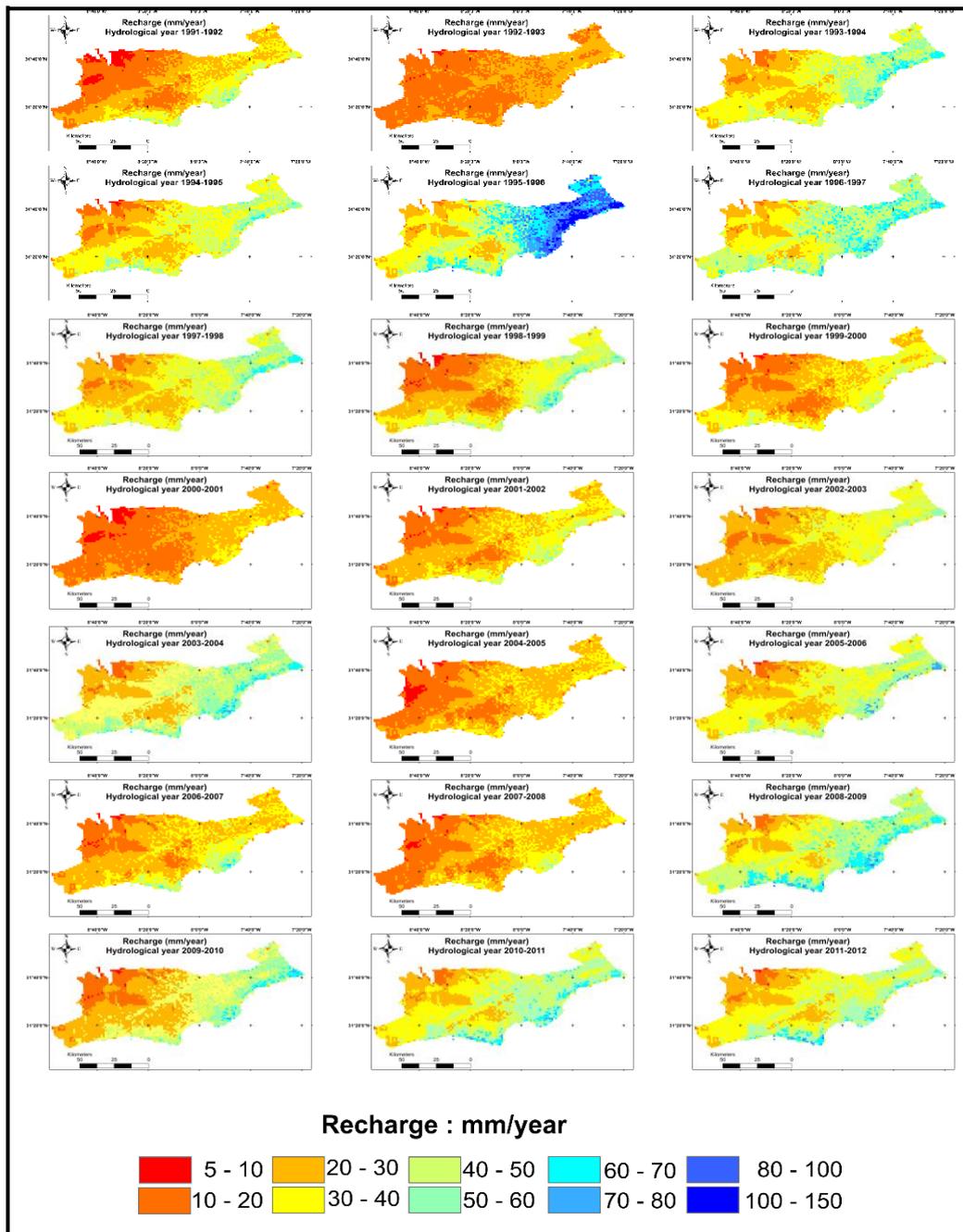


Figure 36 a : Distribution de la recharge spatiale pour 45 ans.

3.5.2. Détermination des cycles de recharge

Pour déterminer les cycles de recharge, la procédure a eu recours aux ondelettes continues en utilisant une série temporelle avec un pas mensuel, chaque sous bassin étant traité à part (Fig. 37 et Fig. 38). Les résultats sont illustrés aux Fig. 39 et 40 qui présentent respectivement les cycles de recharge des sous-bassins de la Rheraya et de l'Ourika. Ces cycles sont quasiment annuels, à l'exception au début de la série temporelle où ils existent des biennaux et quadriennaux.

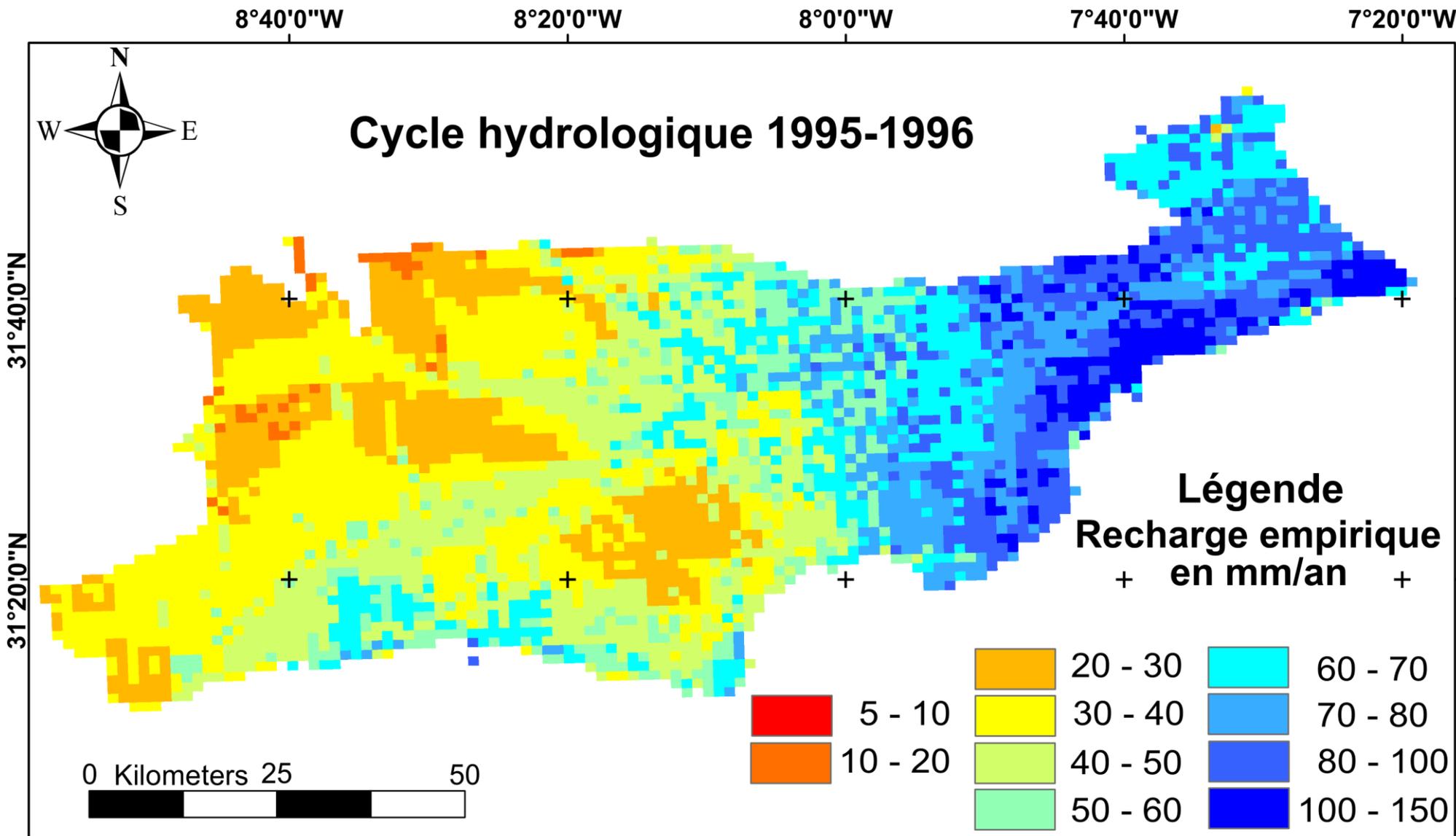


Figure 36 b : Distribution de la recharge spatiale empirique de l'année la plus humide (1995-1996) de la série temporelle (45 ans).

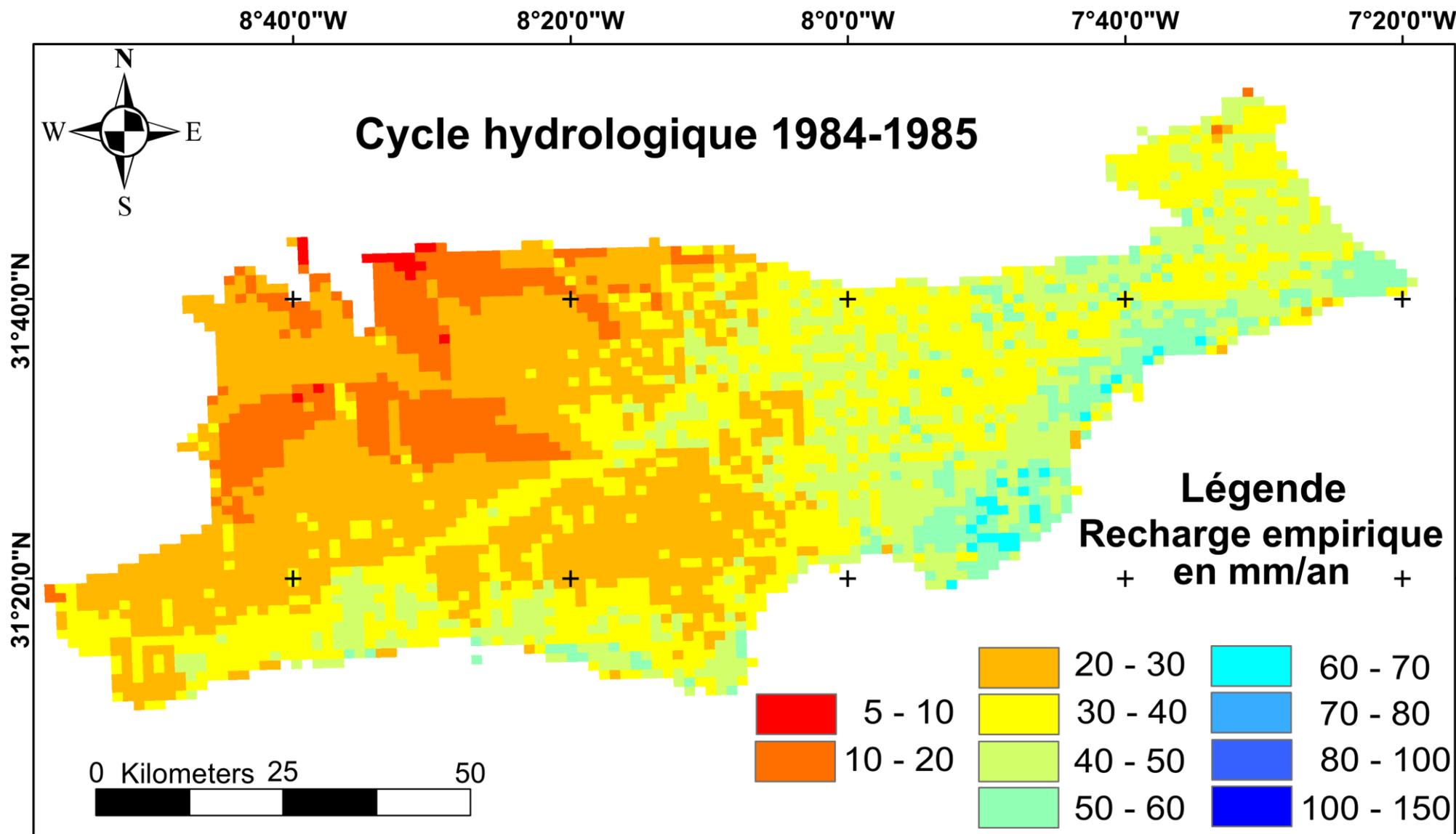


Figure 36 c : Distribution de la recharge spatiale empirique d'une année intermédiaire (1984-1985) de la série temporelle (45 ans).

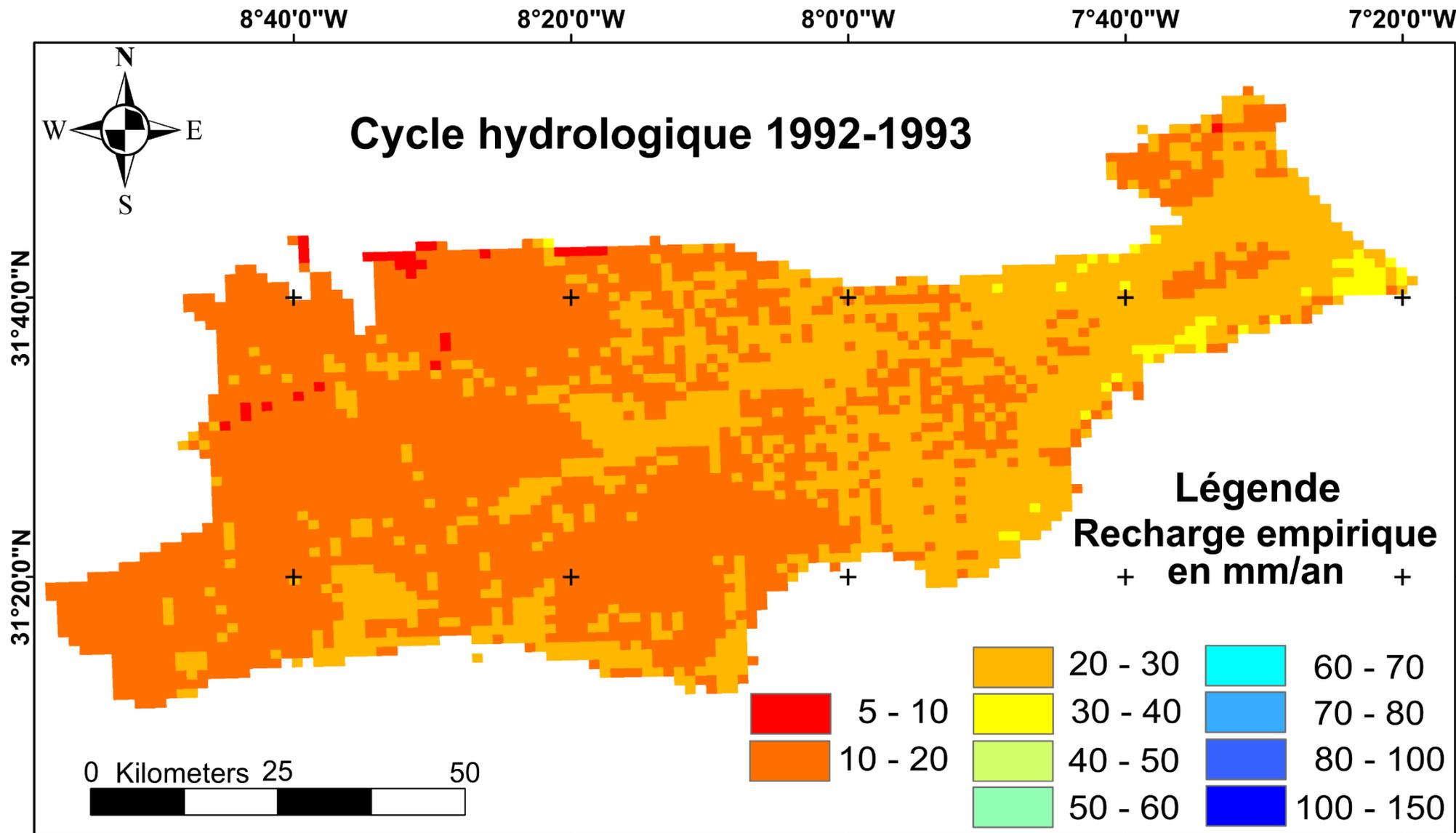


Figure 36 d : Distribution de la recharge spatiale empirique de l'année la plus sèche (1992-1993) de la série temporelle (45 ans).

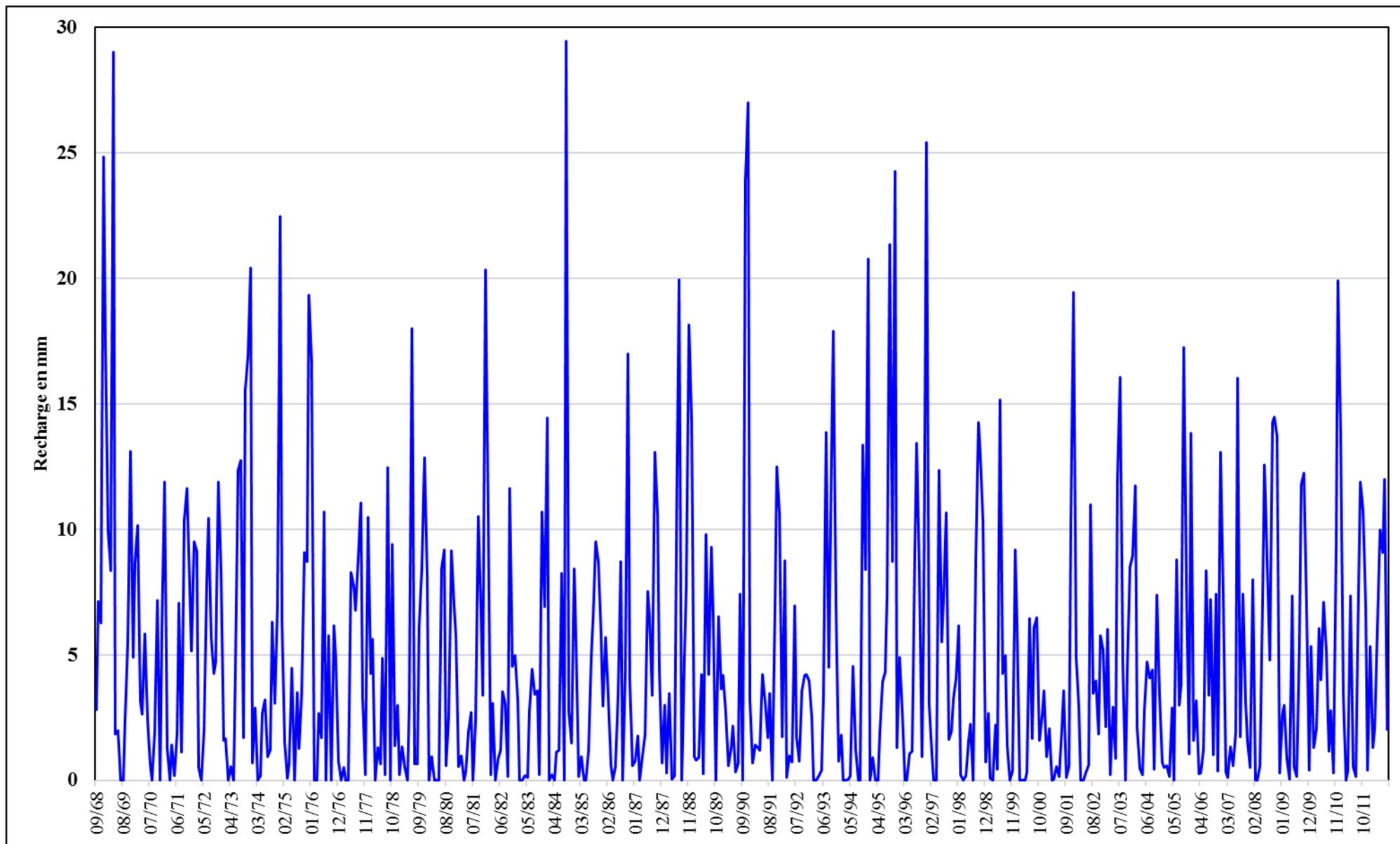


Figure 37 : Répartition mensuelle de la recharge moyenne du sous bassin de la Rheraya.

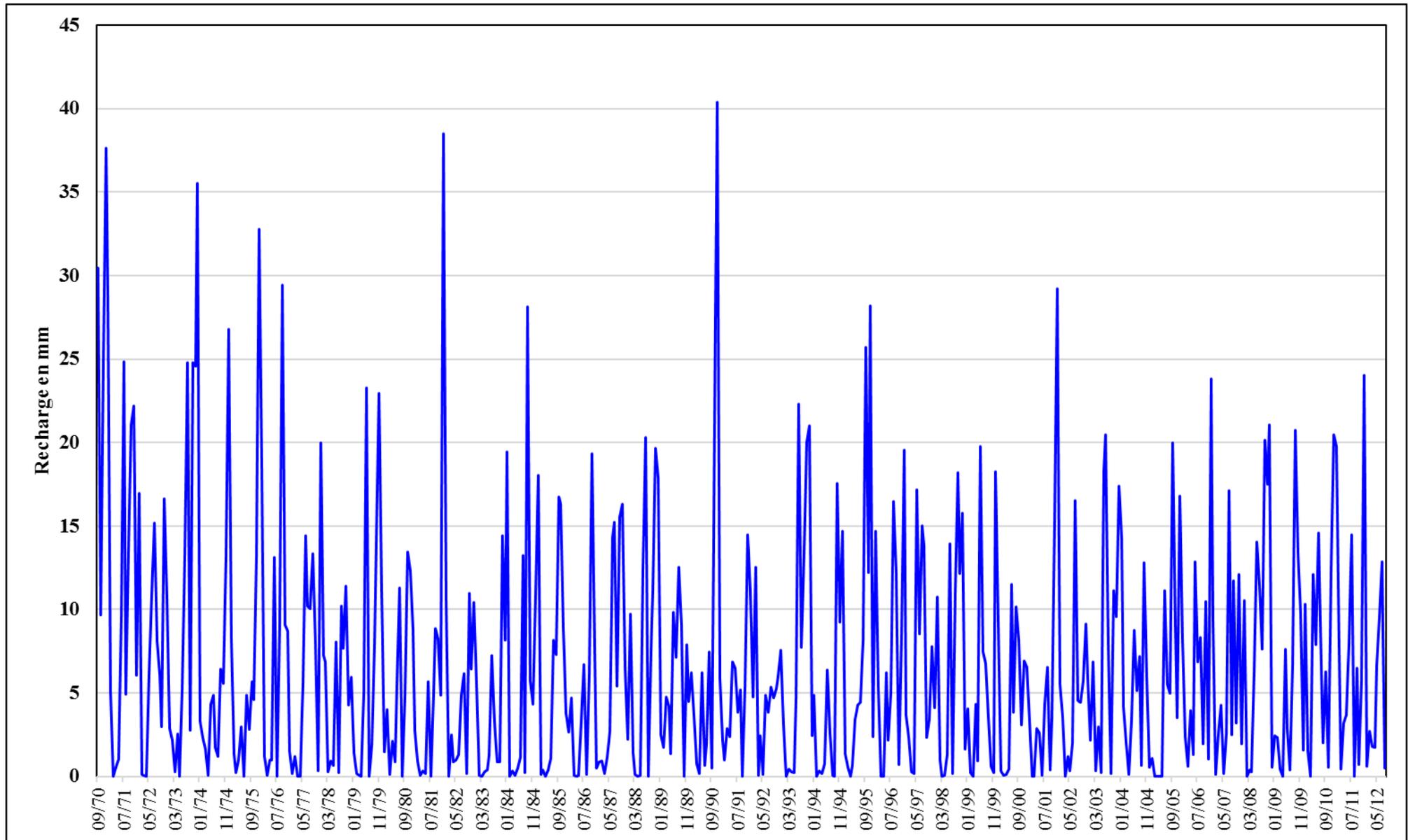


Figure 38 : Répartition mensuelle de la recharge moyenne du sous bassin de l'Ourika.

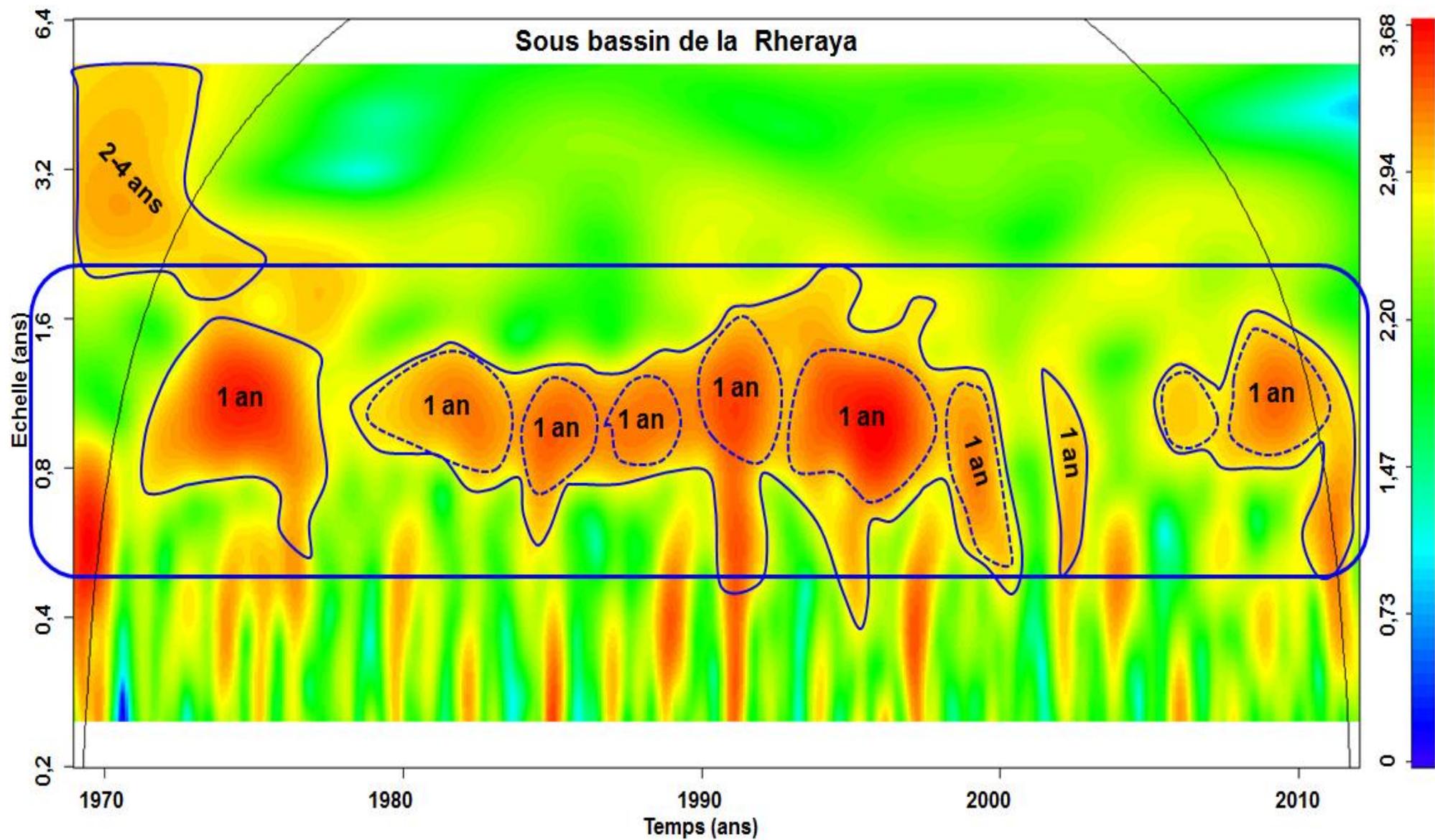


Figure 39 : Détermination des cycles de la recharge du sous bassin de la Rheraya par ondelettes continues.

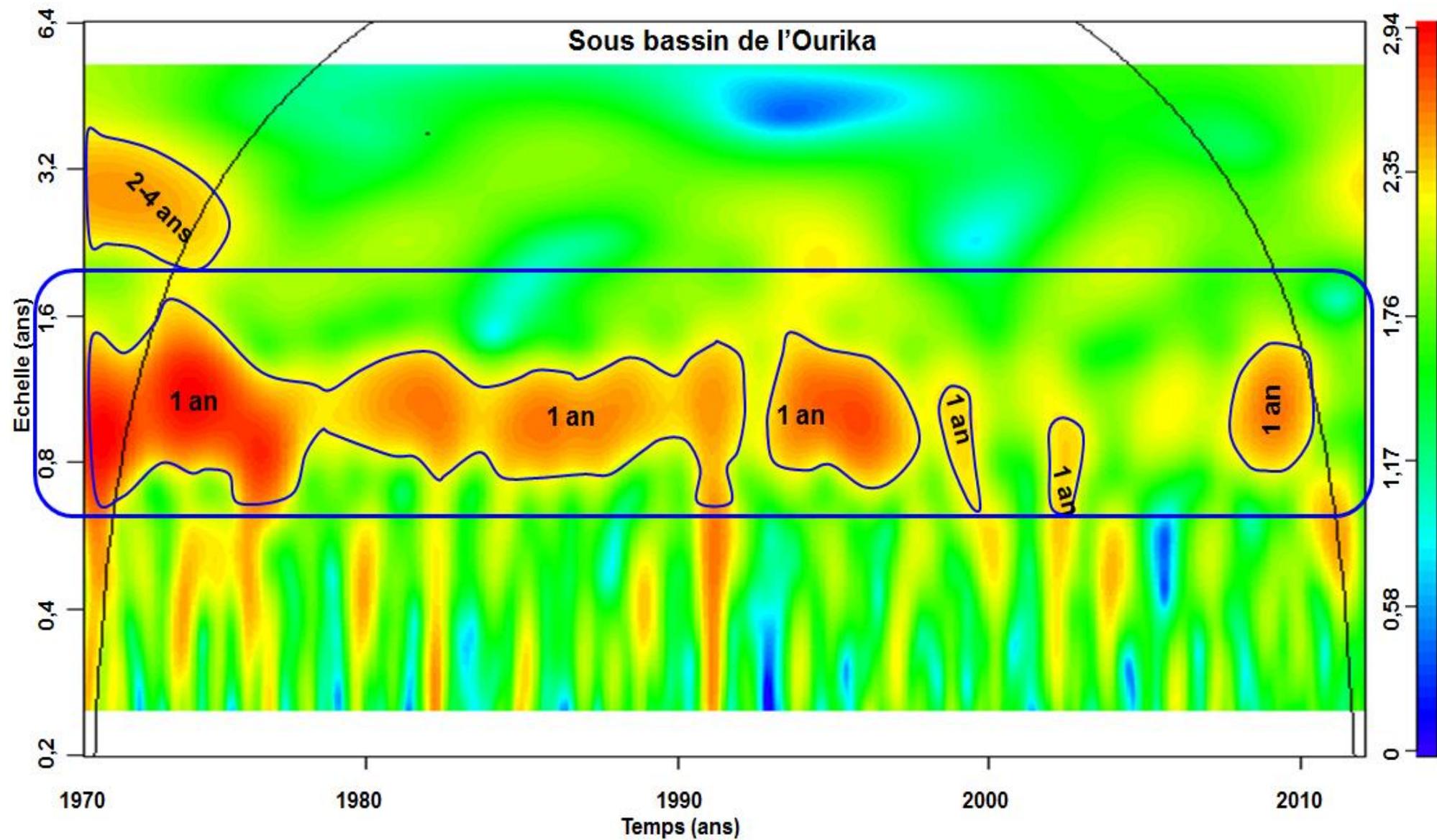


Figure 40 : Détermination des cycles de la recharge du sous bassin de l'Ourika par ondelettes continues.

3.5.3. Relation pluie-recharge

3.5.3.1. Détermination des années sèches et humides du Haouz sur 45 ans

La variable centrée-réduite et la moyenne mobile ont été utilisées pour la détermination des années sèches et humides du Haouz, considéré comme un point dans l'espace, aussi bien pour la pluie que pour la recharge. La Fig. 41 illustre ces résultats sous forme d'histogramme tout en ajoutant les moyennes mobiles correspondantes à chaque paramètre sous forme de courbe.

3.5.3.2. Influence de l'intensité de la pluviométrie sur la recharge

La Fig. 43 compare l'intensité de la pluie avec la recharge du Haouz durant 45 ans. La Fig. 42 illustre la corrélation entre les deux paramètres.

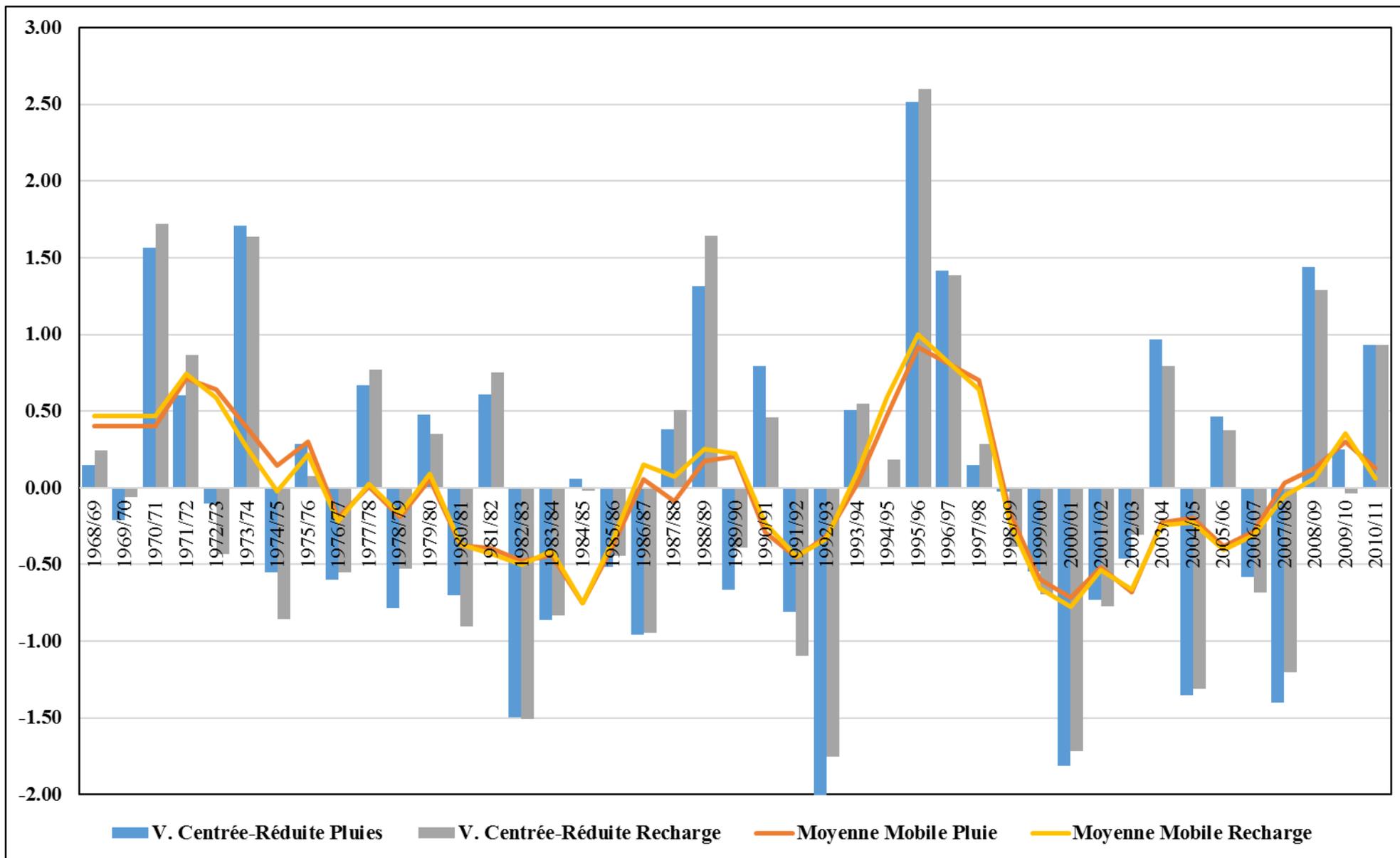


Figure 41 : Distribution de la variable centrée-réduite de la pluie et de la recharge au niveau du Haouz (1967–2012).

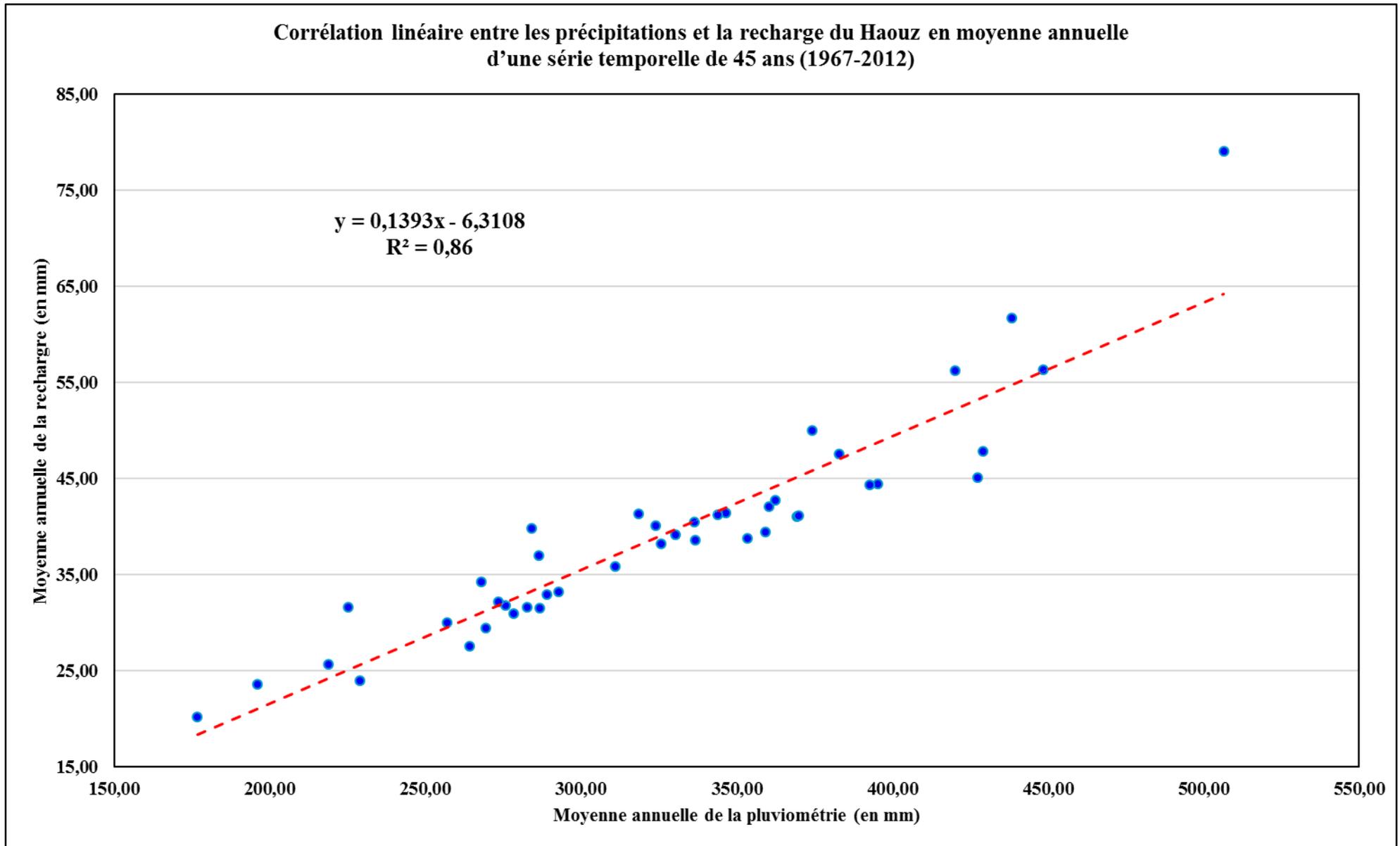


Figure 42 : Corrélation entre précipitation et recharge au niveau du Haouz (moyenne annuelle d'une série temporelle de 45 ans (1967–2012)).

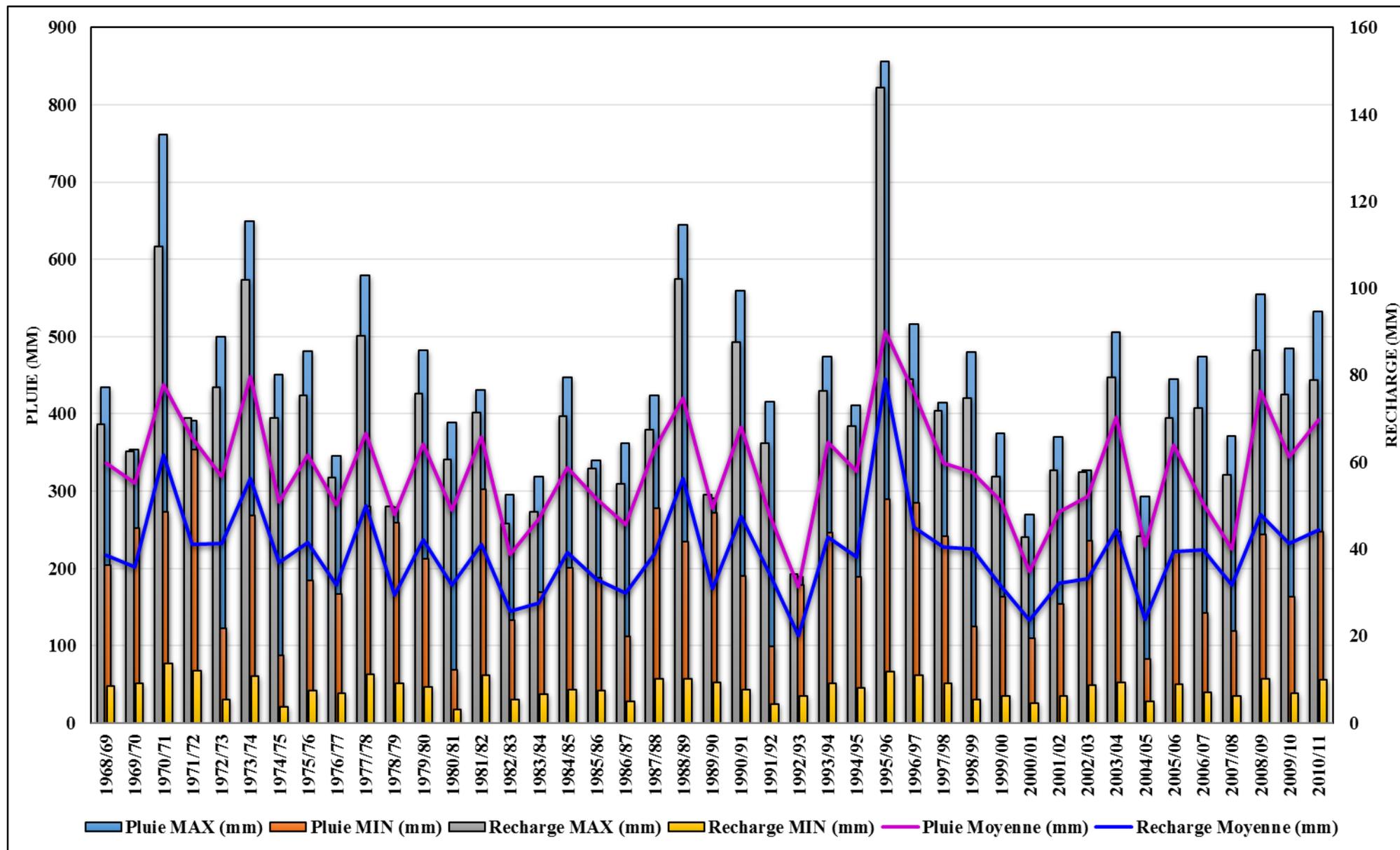


Figure 43 : Évaluation des précipitations et recharge du Haouz (moyenne annuelle d’une série temporelle de 45 ans (1967–2012)).

4. DISCUSSION

La conception et l'utilisation de modèles servant à la gestion optimale et la résolution de problèmes est une démarche devenue très courante grâce au développement conjoint de la métrologie et de l'analyse des signaux. Dans ce sens, le modèle empirique présent estime la recharge spatialisée, principalement pour les zones arides et semi-arides. Ces climats sont souvent rencontrés dans des pays sous-développés (pauvres) qui souffrent d'un faible approvisionnement en eau, ressource vitale qui ne cesse de se dégrader. Dans ce contexte, le modèle (Ait El Mekki et Laftouhi, 2016b) permet de proposer des solutions de recharge des aquifères : simple à utiliser, couvrant de grandes étendues et de faible coût. Ce modèle pourrait contribuer à gérer des aquifères avec efficacité.

La recharge est en effet un paramètre important en hydrogéologie, d'autant plus qu'il est difficile à estimer. Le modèle résulte de la combinaison de sept paramètres qui régissent la recharge en utilisant une combinaison du SIG et la télédétection. Le modèle estime la recharge en utilisant juste une seule variable : l'intensité pluie. Les prévisions de ce modèle, qui reste empirique, doivent être comparées avec des valeurs de référence pour en évaluer la précision et, partant, la confiance qui peut être accordée à ce formalisme. Pour ce faire, une évaluation a été réalisée par une série de formules statistiques servant à la déduction de l'erreur entre ces résultats empiriques et une référence. Le coefficient de corrélation linéaire entre les prévisions et les valeurs prises pour référence atteint 0,89, soit environ 0,9. Il indique une relative bonne régression, mais une incertitude relative qui dépassera 10 %. Effectivement, l'ensemble des prévisions diffèrent des références de 15,48 %, soit en fait 15,5 %. Le modèle n'est donc pas très précis, mais ses prévisions le sont suffisamment pour être utilisées en gestion de la ressource.

Après validation du modèle par la génération de 45 cartes décrivant chacune la répartition spatiale annuelle de la recharge du Haouz (Fig. 36 a), sa légitimité est établie. Par ailleurs, cette procédure a permis la déduction de deux séries temporelles de 45 ans, allant de 1967 jusqu'à 2012, illustrées par les Fig. 37 et 38. Ces dernières peuvent servir à l'étude de la variabilité de la recharge ou à la déduction des années sèches et humides.

En vue de définir les cycles de recharge du sous bassin du Haouz Central constitué par la Rheraya et l'Ourika, le tournage du modèle a été réalisé avec un pas mensuel, contrairement aux traitements précédents, pour obtenir une série temporelle pour chaque sous bassin. Les deux séries ont été présentées par les Fig. 37 et 38 afin de traiter leurs signaux par la méthode de transformée en ondelettes continues sous R pour déduire leurs spectres. La Fig. 39 affiche le spectre du sous bassin de la Rheraya tandis que la Fig. 40 illustre celui de l'Ourika. En l'espace de 45 ans, les deux sous bassins ont toujours connu un cycle de recharge annuel sauf entre la fin des années 60s et le début des années 70s, la recharge ayant eu lieu à la fois par des cycles annuels et par des cycles biennaux à quadriennaux,

ces dernières correspondent à une période de sécheresse généralisée. La comparaison des deux spectres appelle à une remarque : les deux sous bassins ont des cycles de recharge quasi identiques même si les quantités des eaux infiltrées diffèrent.

La variable centrée-réduite de la pluie détermine l'humidité des différentes années hydrologiques : si elle est positive, l'année correspondante est humide, si elle est négative, l'année est sèche (Fig. 41). Serait-il dès lors possible d'utiliser la recharge centrée-réduite à la place de la pluie afin de déterminer les années sèches et humides ? La Fig. 41 compare ces deux variables : toutes deux ainsi que leurs moyennes mobiles sont homologues sauf pour les années 1984–1985 et 2009–2010 où leurs signes diffèrent alors que les moyennes mobiles ont le même comportement. De plus, en 1987–1988, les moyennes divergent alors que les variables ont même signe. En conséquence, pluie et recharge peuvent avoir des comportements différents, mais dans un nombre de cas très limité.

Deux graphiques illustrent la relation pluie-recharge. La Fig. 42 montre une relation linéaire entre la précipitation et la recharge, où le R^2 est de l'ordre de 0,86 ; proche de 1, ce qui indique qu'il existe une relation étroite entre ces deux paramètres. La Fig. 43 compare l'intensité de la pluie avec la recharge, mettant en évidence une homologie entre ces deux paramètres.

Au regard de ce qui précède, il s'avère que l'utilisation de ce modèle est d'une importance capitale puisqu'il peut estimer la recharge des aquifères avec une faible marge d'erreur (< 15,5 %). Ses atouts s'expriment par la simplicité de son utilisation ainsi que par sa capacité à numériser de très grandes étendues pouvant atteindre des milliers de km².

5. CONCLUSION

Le modèle conçu par Ait El Mekki et Laftouhi (2016b) permet d'effectuer des prévisions avec une incertitude de l'ordre de 15,5 %. Une spatialisation de la recharge du Haouz a été établie sur une superficie de 6 200 km². Une série temporelle extraite a servi à la détermination des cycles de recharge des sous bassins de la Rheraya et de l'Ourika, qui sont quasiment annuels depuis l'année 1975 jusqu'à 2012. Auparavant, il existe des cycles biennaux à quadriennaux, cette phase correspond à une période de sécheresse généralisée. La cyclicité annuelle de la recharge met en évidence la vulnérabilité du système aquifère du Haouz et sa forte dépendance quasi-unique vis-à-vis la pluviométrie. La relation pluie-recharge montre une variabilité presque identique même si l'hypothèse de la détermination des années sèches et humides par la recharge à la place de la pluviométrie peut souffrir des exceptions.

Par ailleurs, le modèle est un outil précieux pour l'estimation de la recharge dans les climats arides à semi-arides où les moyens techniques sont restreints ainsi que les budgets. Le modèle constitue également un outil d'aide à la décision pour des projets futurs. Ces derniers visent à déterminer les zones à recharge très faible susceptibles d'être dédiées à l'industrie et l'urbanisme et les zones à forte recharge qui seront quant à elles allouées aux creusements des tranchées de recharge artificielle ou à d'autres projets écologiques non polluants.

Les résultats satisfaisants du modèle incitent à le reproduire dans les autres bassins versants du Maroc ainsi que dans tous les pays sous-développés subissant un climat aride à semi-aride.

CHAPITRE 6. CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans les milieux arides et semi-arides, où les précipitations sont la seule source d'alimentation en eau, des problèmes liés à la mauvaise gouvernance de cette ressource rare et surexploitée sont manifestés, causant leur dégradation quantitative et qualitative. Le Haouz du Maroc s'inscrit dans cette situation.

La thèse présente une méthodologie utilisant des outils pointus présentés par deux méthodes, une directe et l'autre indirecte, estimant le paramètre de la recharge. La quantification de ce dernier est très sollicitée pour l'élaboration des études avancées ou la réalisation de projets futurs.

La méthode indirecte repose sur la conception d'un nouveau modèle empirique unique en son genre basé sur la combinaison du SIG et des techniques de télédétection. Ce modèle compile et intègre les facteurs régissant le potentiel de la recharge en prenant en compte les relations majeures et mineures liant ces paramètres. Le modèle estime le potentiel de la recharge pour une année hydrologique en introduisant simplement la couche de donnée de la précipitation de l'année correspondante. Le résultat obtenu est présenté soit (en mm/an), soit en pourcentage. D'après ce modèle, le Haouz a un potentiel de recharge qui fluctue entre 3,5 et 18,2 %.

La seconde démarche se base sur l'utilisation de l'Équation développée par Eriksson et Khunakasem (1969). Cette approche est approuvée ponctuellement par les chimistes et les hydro-chimistes. Bien que sa régionalisation soit difficile à mettre en œuvre au regard de l'hétérogénéité des aquifères, laquelle influence directement l'homogénéité de la concentration des chlorures, ce travail propose l'utilisation du SIG par la spatialisation des trois paramètres de la relation de Eriksson et Khunakasem (1969). De cette manière, chaque pixel ayant sa pluviométrie et sa concentration, la construction de la carte de la recharge devient possible. La zone d'étude doit être soigneusement sélectionnée pour éviter le moindre ajout des chlorures ne provenant pas des précipitations comme la contamination marine, les activités anthropiques, etc. Afin de mener à bien ce projet, l'échantillonnage des eaux souterraines s'est réalisé à travers 62 puits répartis sur 200 km² du piémont du Haouz Central pour l'année hydrologique 2011–2012. Les résultats obtenus sont consignés sous forme de carte de recharge régionale : cette dernière varie entre 12 et 100 mm/an avec un pourcentage allant de 3 à 25 %.

S'agissant de résultats empiriques, ceux-ci doivent être évalués afin de déduire leur précision. Une série de formules statistiques ont donc été utilisées. Les données de référence prises pour comparaison résultent de la CMB vu son exactitude et sa pertinence. 40 points d'observation ont révélé une erreur inférieure à 15,5 %, ce qui entérine la validité du modèle.

Par la suite, une série temporelle de recharge a été déduite afin de déterminer la relation qui lie la quantité des infiltrations et l'intensité de pluie pour tout le Haouz et d'en déduire les cycles de recharge. Le résultat a mis en évidence l'étroite relation entre la pluie et la recharge où leur corrélation linéaire a abouti à un R^2 égal à 0,86. La recharge du Haouz Central s'effectue annuellement, comme l'indiquent les spectres tracés grâce à la méthode des ondelettes continues. Tout en remarquant que les sous bassins de la Rheraya et de l'Ourika se rechargent d'une manière similaire, même si les quantités d'eau infiltrées diffèrent.

La thèse propose une solution ingénieuse de régionalisation de l'Équation de Eriksson et Khunaksem (1969) afin de déduire la recharge des aquifères avec une grande précision, sur des périmètres restreints toutefois (quelques dizaines à centaines de km^2) vu la sensibilité des conditions d'utilisation de cette équation. Mais elle reste une des meilleures solutions directes surtout avec la solution suggérée par cette thèse pour des périmètres de quelques dizaines à centaines de km^2 mais au-delà cette surface sa manipulation devient impossible.

Le modèle empirique ainsi proposé, est simple d'utilisation et présente un bon rapport qualité-prix, pouvant estimer la recharge.

La reproduction de ce modèle dans les autres plaines du Royaume et dans d'autres régions du monde où règnent les climats arides et semi-arides, qui se distinguent par une surexploitation des ressources en eau et l'absence de budgets destinés à la résolution des problèmes environnementaux, est possible. Ce modèle doit toutefois être utilisé par les gestionnaires des eaux et, plus largement, devrait être intégré dans les protocoles de la gouvernance durable comme un outil d'aide à la décision concernant les choix d'implantations urbaines, des planifications et délimitations des zones industrielles et pour tout projet écologique durable.

RÉFÉRENCES

- ABHT Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (Marrakech, Maroc)
- Abourida A (2007) Approche hydrogéologique de la nappe du Haouz (Maroc) par télédétection, isotopie, SIG et modélisation. Thèse de Doctorat National, Université Cadi Ayyad Faculté des Sciences Semlalia.
- Abourida A, Vincent S, Errouane S, et al (2008) Estimation des volumes d'eau pompés dans la nappe pour l'irrigation (plaine du Haouz, Marrakech, Maroc). Comparaison d'une méthode statistique et d'une méthode basée sur l'utilisation de la télédétection. *J Water Sci* 22:1–13. doi: 10.7202/019820ar.
- Adar EM, Neuman SP (1988) Estimation of spatial recharge distribution using environmental isotopes and hydrochemical data, II. Application to Aravaipa Valley in Southern Arizona, U.S.A. *J Hydrol* 97:279–302. doi: 10.1016/0022-1694(88)90120-5.
- Adar EM, Neuman SP, Woolhiser DA (1988) Estimation of spatial recharge distribution using environmental isotopes and hydrochemical data, I. Mathematical model and application to synthetic data. *J Hydrol* 97:251–277. doi: 10.1016/0022-1694(88)90119-9.
- Adelana S, MacDonald A (2008) *Applied Groundwater Studies in Africa: IAH Selected Papers on Hydrogeology*. CRC Press.
- Ait El Mekki O (2010) Etude de la relation eaux de surface-eaux souterraines au contact de Oued Rheraya avec la plaine du Haouz; Bilan et quantification des apports. Mémoire de Master, Université Cadi Ayyad Faculté des Sciences Semlalia.
- Ait El Mekki O, Laftouhi N-E, Hanich L (2015) Estimate of regional groundwater recharge rate in the Central Haouz Plain, Morocco, using the chloride mass balance method and a geographical information system. *Appl Water Sci* 1–10. doi: 10.1007/s13201-015-0335-6.
- Ait El Mekki O, Laftouhi N-E (2016a) An empirical model to estimate groundwater recharge in arid to semi-arid areas using GIS and Remote Sensing, validated by Chloride Mass-Balance Method. The Haouz Plain, Morocco. *Rendiconti Online Della Soc Geol Ital* 39:479. doi: 10.13140/RG.2.1.3764.5048.
- Ait El Mekki O, Laftouhi N-E (2016b) Combination of a geographical information system and remote sensing data to map groundwater recharge potential in arid to semi-arid areas: the Haouz Plain, Morocco. *Earth Sci Inform* 9:465–479. doi: 10.1007/s12145-016-0268-0.
- Al-Bassam AM, Al-Rumikhani YA (2003) Integrated hydrochemical method of water quality assessment for irrigation in arid areas: application to the Jilh aquifer, Saudi Arabia. *J Afr Earth Sci* 36:345–356. doi: 10.1016/S0899-5362(03)00046-0.
- Al Saud M (2010) Mapping potential areas for groundwater storage in Wadi Aurnah Basin, western Arabian Peninsula, using remote sensing and geographic information system techniques. *Hydrogeol J* 18:1481–1495. doi: 10.1007/s10040-010-0598-9.
- Alcalá FJ, Custodio E (2014) Spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in continental Spain. *Hydrol Process* 28:218–236. doi: 10.1002/hyp.9556.
- Allen DM (1971) Mean Square Error of Prediction as a Criterion for Selecting Variables. *Technometrics* 13:469–475. doi: 10.1080/00401706.1971.10488811.

- Allison GB (1988) A Review of Some of the Physical, Chemical and Isotopic Techniques Available for Estimating Groundwater Recharge. In: Simmers PDI (ed) Estimation of Natural Groundwater Recharge. Springer Netherlands, pp 49–72.
- Allison GB, Barnes CJ, Hughes MW (1983) The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils 2. Experimental. *J Hydrol* 64:377–397. doi: 10.1016/0022-1694(83)90078-1.
- Allison GB, Hughes M (1978) The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer. *Soil Res* 16:181–195.
- Allison GB, Stone WJ, Hughes MW (1985) Recharge in karst and dune elements of a semi-arid landscape as indicated by natural isotopes and chloride. *J Hydrol* 76:1–25. doi: 10.1016/0022-1694(85)90088-5.
- Ambroggi R, Neltner L (1952) Haut Atlas et Anti-Atlas occidentaux: livret-guide de l'excursion C 33.
- Ambroggi R, Thuille G (1952) Haouz de Marrakech.
- Ammary B (2007) Etude géochimique et isotopique des principaux aquifères du bassin Crétacé d'Er-rachidia et de la plaine de Tafilalet. Thèse de Doctorat National, Université Mohammed V.
- Aranyossy JF (1978) Contribution à l'étude des transferts d'eau et de solutés dans la zone non saturée par traçage cationique et isotopique.
- Aranyossy JF, Filly A, Tandia D, et al (1991) Estimation des flux d'évaporation diffuse sous couvert sableux en climat hyper-aride (erg de Bilma, Niger). *Isot Tech Water Resour Dev* 319:309–324.
- Aranyossy JF, Gaye CB (1992) La recherche du pic de tritium thermonucléaire en zone non saturée profonde sous climat semi-aride pour la mesure de la recharge des nappes : première application au Sahel. *Comptes Rendus Académie Sci Sér 2 Mécanique Phys Chim Sci Univers Sci Terre* 315:637–643.
- Armbruster JT (1976) An infiltration index useful in estimating low-flow characteristics of drainage basin. *J Res US Geol Surv* 4:533538.
- Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR (1998) Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development1. *JAWRA J Am Water Resour Assoc* 34:73–89. doi: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.
- Badraoui M (2006) Connaissance et utilisation des ressources en sol au Maroc.
- Bannari A, Teillet P, Landry R (2004) Comparaison de réflectances de surfaces naturelles dans les bandes spectrales homologues des capteurs TM de landsat-5 et ETM+ de landsat-7. *Téléédétection* 4:263–275.
- Banton O, Bangoy LM (1997) Hydrogéologie: multiscience environnementale des eaux souterraines.
- Bazuhair AS, Wood WW (1996) Chloride mass-balance method for estimating ground water recharge in arid areas: examples from western Saudi Arabia. *J Hydrol* 186:153–159. doi: 10.1016/S0022-1694(96)03028-4.
- Bear J, Verruijt A (1998) Modeling Groundwater Flow and Pollution. Springer Science & Business Media.

- Belward AS, Valenzuela CR (1991) Remote sensing and geographical information systems for resource management in developing countries. Kluwer Academic Publishers.
- Bertrand JM, Bertrand-Sarfati J, Bessoles B (2013) Afrique de l'Ouest: Introduction Géologique et Termes Stratigraphiques. Elsevier.
- Biron P-E (1982) Le Permo-Trias de la région de l'Ourika (Haut-Atlas de Marrakech, Maroc): lithostratigraphie, sédimentologie, tectonique et minéralisations. Thèse de Doctorat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble.
- Blaney HF (1952) Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data.
- Boudouresque C.F 2013. Manuel de rédaction scientifique et technique. Edition 2014-2015. MIO (Mediterranean Institute of Oceanography), Aix-Marseille Université publ., Marseille : 1-91.
- Castany G (1982) Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Bordas.
- Celierier J (1925) Contribution à l'étude hydrogéologique du Haouz occidental et de la plaine du Haouz: Les eaux de Marrakech.
- Chai T, Draxler RR (2014) Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Geosci Model Dev Discuss 7:1525–1534. doi: 10.5194/gmdd-7-1525-2014.
- Chang TJ, Kavvas ML, Delleur JW (1984) Daily Precipitation Modeling by Discrete Autoregressive Moving Average Processes. Water Resour Res 20:565–580. doi: 10.1029/WR020i005p00565.
- Chapelle F (2001) Ground-Water Microbiology and Geochemistry. John Wiley & Sons.
- Childs C (2004) Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst. ArcUser 32–35.
- Chowdhury A, Jha MK, Chowdary VM (2010) Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur district, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques. Environ Earth Sci 59:1209–1222. doi: 10.1007/s12665-009-0110-9.
- Cochet A (1962) Alimentation en eau de Marrakech note hydrologique en vue de la recherche d'un débit de 40 l/s pour 1962 et 100 l/s pour 1966. MTPC/DH/DRE.
- Concaret J (1960) Etude pédologique d'une zone du Haouz de Marrakech (Soueilah Mrabtime) (Royaume du Maroc). Génie Rural du Sud, Marrakech.
- Cook GP, EDMUNDS WM, B GC (1992) Estimating paleorecharge and paleoclimate from unsaturated zone profiles. doi: 10.1029/92WR01298.
- Coyle EJ, Lin J-H (1988) Stack filters and the mean absolute error criterion. IEEE Trans Acoust Speech Signal Process 36:1244–1254. doi: 10.1109/29.1653.
- Dar IA, Sankar K, Dar MA (2011) Deciphering groundwater potential zones in hard rock terrain using geospatial technology. Environ Monit Assess 173:597–610. doi: 10.1007/s10661-010-1407-6.
- Darcy H (1856) Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application ... Victor Dalmont.

- Das D (2000) GIS application in hydrogeological studies. In: GISdevelopment.net. <http://www.gisdevelopment.net/application/nrm/water/overview/wato0003pf.htm>.
- Das S, Behera SC, Kar A, et al (1997) Hydrogeomorphological mapping in ground water exploration using remotely sensed data — a case study in keonjhar district, orissa. *J Indian Soc Remote Sens* 25:247–259. doi: 10.1007/BF03019366.
- Dauteloup J (1958a) Carte des roches mères du Haouz de Marrakech, Maroc.
- Dauteloup J (1958b) Carte pédologique : Haouz de Marrakech : Maroc.
- Dauteloup J (1958c) Carte pédologique : Haouz de Marrakech (région Est) : F2.
- Dauteloup J (1958d) Carte pédologique : Haouz de Marrakech (région Est) : F1.
- Dauteloup J (1959) Carte de tri des sols : Haouz de Marrakech.
- Demangeot J (1944) Essai de bibliographie des formes nivales : coulées rocheuses, sols polygonaux, etc. *Rev Géographie Alp* 32:505–511. doi: 10.3406/rga.1944.5074.
- Dettinger MD (1989) Reconnaissance estimates of natural recharge to desert basins in Nevada, U.S.A., by using chloride-balance calculations. *J Hydrol* 106:55–78. doi: 10.1016/0022-1694(89)90166-2.
- Diouf OC, Faye SC, Diedhiou M, et al (2013) Combined uses of water-table fluctuation (WTF), chloride mass balance (CMB) and environmental isotopes methods to investigate groundwater recharge in the Thiaroye sandy aquifer (Dakar, Senegal). *Afr J Environ Sci Technol* 6:425–437. doi: 10.4314/ajest.v6i11.
- Direction de Géologie (1982) Carte Structurale du Maroc.
- Dissanayake CB (1991) The fluoride problem in the ground water of Sri Lanka — environmental management and health. *Int J Environ Stud* 38:137–155. doi: 10.1080/00207239108710658.
- Dougherty ER, Loce RP (1993) Optimal mean-absolute-error hit-or-miss filters: morphological representation and estimation of the binary conditional expectation. *Opt Eng* 32:815–827. doi: 10.1117/12.132376.
- Dutton R (1998) *Arid Land Resources and Their Management: Jordan's Desert Margin*. Routledge.
- Edmunds WM, Walton NRG (1980) A geochemical and isotopic approach to recharge evaluation in semi-arid zones. Past and present.
- Edmunds WM, Darling WG, Kinniburgh DG (1988) Solute Profile Techniques for Recharge Estimation in Semi-Arid and Arid Terrain. In: Simmers PDI (ed) *Estimation of Natural Groundwater Recharge*. Springer Netherlands, pp 139–157.
- Edmunds W, Fellman E, Goni I, Prudhomme C (2002) Spatial and temporal distribution of groundwater recharge in northern Nigeria. *Hydrogeol J* 10:205–215. doi: 10.1007/s10040-001-0179-z.
- El Moukhayar R, Bahir M, Chamchati H, et al (2014) Using Geochemical and Isotope Investigations for Groundwater Management Strategies Under Semi-Arid Area: Case of the Wadi Ouazzi Basin (Morocco). *J Environ Earth Sci* 4:18–30.

- Ephraim Y, Malah D (1984) Speech enhancement using a minimum-mean square error short-time spectral amplitude estimator. *IEEE Trans Acoust Speech Signal Process* 32:1109–1121. doi: 10.1109/TASSP.1984.1164453.
- Eriksson E (1981) *Hydrochemistry: Chemical processes in the water cycle*, 04 October 2013. Springer.
- Eriksson E, Khunakasem V (1969) Chloride concentration in groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel Coastal Plain. *J Hydrol* 7:178–197. doi: 10.1016/0022-1694(69)90055-9.
- ESRI (2005) *Arc Hydro Tools - Tutorial*.
- Faber N (Klaas) M (1999) Estimating the uncertainty in estimates of root mean square error of prediction: application to determining the size of an adequate test set in multivariate calibration. *Chemom Intell Lab Syst* 49:79–89. doi: 10.1016/S0169-7439(99)00027-1.
- FAO (1992) Chapitre I - Les environnements arides. In: *Foresterie en zones arides - Guide à l'intention des techniciens de terrain*. Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie.
- Fernandes PG, Carreira PM, Bahir M (2009) Mass balance simulation and principal components analysis applied to groundwater resources: Essaouira basin (Morocco). *Environ Earth Sci* 59:1475–1484. doi: 10.1007/s12665-009-0133-2.
- Ferrandini J, Ferrandini M (1984) Présence du Lias et du Jurassique moyen sur le versant Nord du Haut-Atlas de Marrakech (Maroc). *Histoire paléogéographique. Comptes-Rendus Séances Académie Sci Sér 2 Mécanique-Phys Chim Sci Univers Sci Terre* 299:351–356.
- Fick A (1855) Ueber Diffusion. *Ann Phys* 170:59–86. doi: 10.1002/andp.18551700105.
- Filippi C, Milville F, Thiery D (1990) Evaluation de la recharge naturelle des aquifères en climat Soudano-Sahélien par modélisation hydrologique globale: application a dix sites au Burkina Faso. *Hydrol Sci J* 35:29–48.
- Fontes JC, Edmunds WM (1989) Use of environmental isotope techniques in arid zone hydrology: A critical review. <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=RE-PIDISCA&lang=p&nextAction=Ink&exprSearch=97798&indexSearch=ID>. Accessed 19 Oct 2016.
- Fontes JC, Olivry J-C (1976) Gradient isotopique entre 0 et 4000 m dans les précipitations du Mont Cameroun (Résumé de communication) Réunion annuelle des Sciences de la Terre, 4, Paris (FRA), 1976/04/13-16. Soc. géologique de France, Paris.
- Fouty SC (1989) Chloride mass balance as a method for determining long-term groundwater recharge rates and geomorphic-surface stability in arid and semi-arid regions, Whisky Flat and Beatty, Nevada.
- Freeze RA, Cherry JA (1979) *Groundwater*. <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=RE-PIDISCA&lang=p&nextAction=Ink&exprSearch=149998&indexSearch=ID>. Accessed 19 Oct 2016.

- Fritier N, Massei N, Laignel B, et al (2012) Links between NAO fluctuations and inter-annual variability of winter-months precipitation in the Seine River watershed (north-western France). *Comptes Rendus Geosci* 344:396–405. doi: 10.1016/j.crte.2012.07.004.
- Frödin J (1922) Géographie physique de l'ouest du Maroc. *Geogr Ann* 4:58–76.
- Gad A (2002) Changes in Land Use and Land Cover in Arid Southern Mediterranean on the Long Term Using Remote Sensing and GIS — A Case Study of Northwest Egypt. In: Barnes I (ed) *Global Atmospheric Change and its Impact on Regional Air Quality*. Springer Netherlands, pp 195–201.
- Ganapuram S, Kumar GTV, Krishna IVM, et al (2009) Mapping of groundwater potential zones in the Musi basin using remote sensing data and GIS. *Adv Eng Softw* 40:506–518. doi: 10.1016/j.advengsoft.2008.10.001.
- Gaye CB, Edmunds WM (1996) Groundwater recharge estimation using chloride, stable isotopes and tritium profiles in the sands of northwestern Senegal. *Environ Geol* 27:246–251. doi: 10.1007/BF00770438.
- Gee GW, Hillel D (1988) Groundwater recharge in arid regions: Review and critique of estimation methods. *Hydrol Process* 2:255–266. doi: 10.1002/hyp.3360020306.
- Gee GW, Zhang ZF, Tyler SW, et al (2005) Chloride Mass Balance Cautions in Predicting Increased Recharge Rates. *Vadose Zone J* 4:72–78. doi: 10.2113/4.1.72.
- Gentil L (1906) Contribution à la géologie et à la géographie physique du Maroc. *Ann Géographie* 15:133–151. doi: 10.3406/geo.1906.5110.
- Genxu W, Guodong C (2001) Fluoride distribution in water and the governing factors of environment in arid north-west China. *J Arid Environ* 49:601–614. doi: 10.1006/jare.2001.0810.
- Gilroy EJ, Hirsch RM, Cohn TA (1990) Mean square error of regression-based constituent transport estimates. *Water Resour Res* 26:2069–2077. doi: 10.1029/WR026i009p02069.
- Glynn PD, Plummer LN (2005) Geochemistry and the understanding of ground-water systems. *Hydrogeol J* 13:263–287. doi: 10.1007/s10040-004-0429-y.
- Goodin JR, Northington DK (1985) *Plant resources of arid and semiarid lands: a global perspective*. Academic Press.
- Gottmann J (1946) French geography in wartime. *Geogr Rev* 36:80–91.
- Guan H, Love A, Simmons CT, et al (2009) Catchment conceptualisation for examining applicability of chloride mass balance method in an area of historical forest clearance. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 6:7025–7053.
- Guo D, Shamai S, Verdu S (2005) Mutual Information and Minimum Mean-Square Error in Gaussian Channels. *IEEE Trans Inf Theory* 51:1261–1282. doi: 10.1109/TIT.2005.844072.
- Gustard A (1997) *FRIEND'97: Regional Hydrology : Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management*. International Association of Hydrological Sciences.
- Gyasi-Agyei Y, Willgoose G, De Troch FP (1995) Effects of vertical resolution and map scale of digital elevation models on geomorphological parameters used in hydrology. *Hydrol Process* 9:363–382. doi: 10.1002/hyp.3360090310.

- Hagedorn B (2015) Hydrochemical and ^{14}C constraints on groundwater recharge and interbasin flow in an arid watershed: Tule Desert, Nevada. *J Hydrol* 523:297–308. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.037.
- Haridas V, Aravindan S, Girish G (1998) Remote sensing and its application for ground water favorable area identification. *J Geol Assoc Res Cent* 6:18–22.
- Harinarayanan P, Gopalakrishna GS, Balasubramanian A (2000) Remote sensing data for groundwater development and management in Keralapura watersheds of Cauvery Basin, Karnataka, India. *Indian Mineral* 34:11–17.
- Harrigan J (1996) Technology, Factor Supplies and International Specialization: Estimating the Neoclassical Model. National Bureau of Economic Research.
- Helldén U (1987) An assessment of woody biomass, community forests, land use and soil erosion in Ethiopia. A feasibility study on the use of remote sensing and GIS [geographical information system]-analysis for planning purposes in developing countries. 75 pp.
- Holland DS, Sutinen JG (2011) An empirical model of fleet dynamics in New England trawl fisheries - *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/f98-169#.V8wEhyjhCM8>. Accessed 4 Sep 2016.
- Holland HD (1972) The geologic history of sea water—an attempt to solve the problem. *Geochim Cosmochim Acta* 36:637–651. doi: 10.1016/0016-7037(72)90108-1.
- Horton RE (1932) Drainage-basin characteristics. *Eos Trans Am Geophys Union* 13:350–361. doi: 10.1029/TR013i001p00350.
- Horton RE (1945) Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Geol Soc Am Bull* 56:275–370. doi: 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2.
- Hosking JRM (1984) Modeling persistence in hydrological time series using fractional differencing. *Water Resour Res* 20:1898–1908. doi: 10.1029/WR020i012p01898.
- Howard KWF, Mullings E (1996) Hydrochemical Analysis of Ground-Water Flow and Saline Incur-sion in the Clarendon Basin, Jamaica. *Ground Water* 34:801–810. doi: 10.1111/j.1745-6584.1996.tb02074.x.
- Huang T, Pang Z (2010) Estimating groundwater recharge following land-use change using chloride mass balance of soil profiles: a case study at Guyuan and Xifeng in the Loess Plateau of China. *Hydrogeol J* 19:177–186. doi: 10.1007/s10040-010-0643-8.
- Hughes J, Heathwaite L (1995) *Hydrology and hydrochemistry of British wetlands*. John Wiley & Sons.
- Hyndman RJ, Koehler AB (2006) Another look at measures of forecast accuracy. *Int J Forecast* 22:679–688. doi: 10.1016/j.ijforecast.2006.03.001.
- INRA du Maroc, Ministère de l’Agriculture du Maroc, Le groupe OCP du Maroc (2009) *Carte de Fertilité des Sols*.
- James A, Aadland D (2011) The curse of natural resources: An empirical investigation of U.S. coun-ties. *Resour Energy Econ* 33:440–453. doi: 10.1016/j.reseneeco.2010.05.006.
- Japan Space Systems (2011) *ASTER GDEM*.

- Jensen JR, Lulla DK (1987) Introductory digital image processing: A remote sensing perspective. *Geocarto Int* 2:65–65. doi: 10.1080/10106048709354084.
- Jha MK, Chowdary VM (2007) Challenges of using remote sensing and GIS in developing nations. *Hydrogeol J* 15:197–200. doi: 10.1007/s10040-006-0117-1.
- Johansson PO (1986) The economics of forestry and natural resources.
- Jose ML, Lancaster C, Stevens JL (1996) Corporate returns and cash conversion cycles. *J Econ Finance* 20:33. doi: 10.1007/BF02920497.
- Khodaei K, Nassery HR (2013) Groundwater exploration using remote sensing and geographic information systems in a semi-arid area (Southwest of Urmieh, Northwest of Iran). *Arab J Geosci* 6:1229–1240. doi: 10.1007/s12517-011-0414-4.
- Kouadio KE, Savane I, Lasm T, Biemi J (2008) Hydrogeology prospecting in crystalline and metamorphic area by spatial analysis of productivity potential. *Eur J Sci Res* 22:373–390.
- Krishnamurthy J, Kumar N, Jayaraman V, Manivel M (1996) An approach to demarcate groundwater potential zones through remote sensing and a geographic information system. *Int J Remote Sens* 17:1867–1885.
- Kumar P, Foufloula-Georgiou E (1997) Wavelet analysis for geophysical applications. *Rev Geophys* 35:385–412. doi: 10.1029/97RG00427.
- Kumar SK, Chandrasekar N, Seralathan P, et al (2012) Hydrogeochemical study of shallow carbonate aquifers, Rameswaram Island, India. *Environ Monit Assess* 184:4127–4138. doi: 10.1007/s10661-011-2249-6.
- Labat D, Ababou R, Mangin A (2000) Rainfall–runoff relations for karstic springs. Part II: continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. *J Hydrol* 238:149–178. doi: 10.1016/S0022-1694(00)00322-X.
- Laignel B, Massei N, Rossi A, et al (2010) Water resources variability in the context of climatic fluctuations on both sides of the Atlantic Ocean. In: IAHS-AISH publication. International Association of Hydrological Sciences, pp 612–619.
- Lambrakis N, George S, Konstantina K (2011) *Advances in the Research of Aquatic Environment*. Springer.
- Landry B, Mercier M (1992) *Notion de géologie*.
- Lanen HV, Demuth S (2002) *FRIEND 2002: Regional Hydrology : Bridging the Gap Between Research and Practice*. IAHS.
- Le Rouget G (1973a) Région Marrakech ouest - Oued Tensift esquisse cartographique de la répartition des roches et dépôts superficiels.
- Le Rouget G (1973b) Région Marrakech ouest - Oued Tensift : carte pédologique.
- Le Rouget G (1975) Région Marrakech est-Tahnaout : carte pédologique.
- Leblanc M, Favreau G, Tweed S, et al (2007) Remote sensing for groundwater modelling in large semiarid areas: Lake Chad Basin, Africa. *Hydrogeol J* 15:97–100. doi: 10.1007/s10040-006-0126-0.

- Leblanc M, Leduc C, Razack M, et al (2003) Application of remote sensing and GIS for groundwater modeling of large semiarid areas: example of the Lake Chad Basin, Africa. In: Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions: Papers Selected for the International Conference on Hydrology of the Mediterranean and Semi-Arid Regions, Held in Montpellier, France from 1 to 4 April 2003. International Association of Hydrological Sciences, p 186e192.
- List JA, Gallet CA (2001) What Experimental Protocol Influence Disparities Between Actual and Hypothetical Stated Values? *Environ Resour Econ* 20:241–254. doi: 10.1023/A:1012791822804.
- Liu G, Wang Y, Zhang Y, Song T (2009) Application of chloride profile and water balance methods in estimating groundwater recharge in Luanjing Irrigation Area, Inner Mongolia / Application des méthodes du profil de chlorure et du bilan hydrique pour l'estimation de la recharge hydrogéologique dans le Périmètre Irrigué de Luanjing, Mongolie Intérieure. *Hydrol Sci J* 54:961–973. doi: 10.1623/hysj.54.5.961.
- Lo Russo S, Zavattaro L, Acutis M, Zuppi GM (2003) Chloride profile technique to estimate water movement through unsaturated zone in a cropped area in subhumid climate (Po Valley—NW Italy). *J Hydrol* 270:65–74. doi: 10.1016/S0022-1694(02)00278-0.
- Ma JZ, Wang XS, Edmunds WM (2005) The characteristics of ground-water resources and their changes under the impacts of human activity in the arid Northwest China—a case study of the Shiyang River Basin. *J Arid Environ* 61:277–295. doi: 10.1016/j.jaridenv.2004.07.014.
- Machiwal D, Jha MK, Mal BC (2011) Assessment of Groundwater Potential in a Semi-Arid Region of India Using Remote Sensing, GIS and MCDM Techniques. *Water Resour Manag* 25:1359–1386. doi: 10.1007/s11269-010-9749-y.
- MaDGIC (2012) Calculating Geometry and Drainage Density. Trent University Library, Ontario, Canada.
- Magesh NS, Chandrasekar N, Soundranayagam JP (2011a) Morphometric evaluation of Papanasam and Manimuthar watersheds, parts of Western Ghats, Tirunelveli district, Tamil Nadu, India: a GIS approach. *Environ Earth Sci* 64:373–381. doi: 10.1007/s12665-010-0860-4.
- Magesh NS, Chandrasekar N, Soundranayagam JP (2012) Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geosci Front* 3:189–196. doi: 10.1016/j.gsf.2011.10.007.
- Magesh NS, Chandrasekar N, Vetha Roy D (2011b) Spatial analysis of trace element contamination in sediments of Tamiraparani estuary, southeast coast of India. *Estuar Coast Shelf Sci* 92:618–628. doi: 10.1016/j.ecss.2011.03.001.
- Mahler P (1960a) Pédologie du périmètre des Ouled Yacoub. (IN) Royaume du Maroc.
- Mahler P (1960b) Pédologie de la zone de l'Oued N'Fis. (IN) Royaume du Maroc.
- Mahler P (1960c) Pédologie de la zone de l'Oued R'dat. (IN) Royaume du Maroc.
- Mahler P (1960d) Oued Tensift (Maroc).
- Makkink GF (1957) Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J Inst Water Eng* 11:277–288.

- Marei A, Khayat S, Weise S, et al (2010) Estimating groundwater recharge using the chloride mass-balance method in the West Bank, Palestine. *Hydrol Sci J* 55:780–791. doi: 10.1080/02626667.2010.491987.
- Margat J, Gun JVD (2013) *Groundwater around the World: A Geographic Synopsis*. CRC Press.
- Maselli F, Conese C, Petkov L, Resti R (1992) Inclusion of prior probabilities derived from a non-parametric process into the maximum-likelihood classifier. *Photogramm Eng Remote Sens* 58:201–207.
- Massei N, Laignel B, Deloffre J, et al (2010) Long-term hydrological changes of the Seine River flow (France) and their relation to the North Atlantic Oscillation over the period 1950–2008. *Int J Climatol* 30:2146–2154. doi: 10.1002/joc.2022.
- Mazor E (2003) *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. CRC press.
- Meybeck M, Helmer R (1989) The quality of rivers: From pristine stage to global pollution. *Glob Planet Change* 1:283–309. doi: 10.1016/0921-8181(89)90007-6.
- Michard A (1976) *Eléments de géologie marocaine*, Éditions du Service géologique du Maroc.
- Mohseni O, Stefan HG, Erickson TR (1998) A nonlinear regression model for weekly stream temperatures. *Water Resour Res* 34:2685–2692. doi: 10.1029/98WR01877.
- Monteith JL (1965) Evaporation and environment. *Symp Soc Exp Biol* 19:205–234.
- Moret L (1931) *Recherches Géologiques dans l'Atlas de Marrakech*. Extrait des Notes et Mémoires du Service des Mines et de la Carte Géologique du Maroc, Université de Grenoble.
- Moriasi DN, Arnold JG, Liew MWV, et al (2007) Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Trans ASABE* 50:885–900. doi: 10.13031/2013.23153.
- Moukhchane M (1983) *Contribution à l'étude des réservoirs profonds de la bordure nord de l'Atlas entre Demnate et Imintanoute (Maroc)*. Thèse de 3ème cycle, Besançon.
- Mukherjee P, Singh CK, Mukherjee S (2012) Delineation of Groundwater Potential Zones in Arid Region of India—A Remote Sensing and GIS Approach. *Water Resour Manag* 26:2643–2672. doi: 10.1007/s11269-012-0038-9.
- Münch Z, Conrad J (2007) Remote sensing and GIS based determination of groundwater dependent ecosystems in the Western Cape, South Africa. *Hydrogeol J* 15:19–28. doi: 10.1007/s10040-006-0125-1.
- Muralidhar M, Raju KR., Raju KSVP, Prasad JR (2000) Remote sensing applications for the evaluation of water resources in rainfed area, Warangal district, Andhra Pradesh. *Indian Mineral* 34:33–40.
- Murphy EM, Ginn TR, Phillips JL (1996) Geochemical Estimates of Paleorecharge in the Pasco Basin: Evaluation of the Chloride Mass Balance Technique. *Water Resour Res* 32:2853–2868. doi: 10.1029/96WR01529.
- Murthy KSR (2000) Ground water potential in a semi-arid region of Andhra Pradesh - a geographical information system approach. *Int J Remote Sens* 21:1867–1884. doi: 10.1080/014311600209788.

- Musy A, Soutter M (1991) Physique du sol. PPUR presses polytechniques.
- NASA LandSat.
- Nathan RJ, McMahon TA (1990) Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resour Res* 26:1465–1473. doi: 10.1029/WR026i007p01465.
- Nolan BT, Healy RW, Taber PE, et al (2007) Factors influencing ground-water recharge in the eastern United States. *J Hydrol* 332:187–205. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.06.029.
- Patil MB, Desai CG, Umrikar BN (2012) Image classification tool for Land Use/Land cover analysis: A Comparative Study Of Maximum Likelihood and Minimum Distance Method. *Int J Geol Earth Environ Sci* 2:189–196.
- Penman, H.L. (1948): *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proc. Roy. Soc. London A(194), S. 120-145.
- Peters NE, Coudrain-Ribstein A (1997) Hydrochemistry. International Association of Hydrological Sciences IAHS, Wallingford, Oxfordshire, UK.
- Philip GM, Watson DF (1982) A Precise Method for Determining Contoured Surfaces. *Aust Pet Explor Assoc J* 22:205–212.
- Piqué A, Soulaïmani A, Hoepffner C, et al (2007) Géologie du Maroc, Geode. Imprimerie El Watahya, Marrakesh, Morocco.
- Priestley CHB (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Mon Weather Rev* 81–92.
- Razouki B (2001) Mise en place d'un système de gestion de base de données pour la gestion des ressources en eaux souterraines de la plaine du Haouz (Meseta Occidentale, Maroc). Thèse de Doctorat National, Université Cadi Ayyad Faculté des Sciences Semlalia.
- Raynaud H (1925a) Contribution à l'étude hydro-géologique du Haut-Atlas occidental et de la Plaine du Haouz: les eaux de Marrakech. Bosc & Riou.
- Raynaud H (1925b) Les eaux de Marrakech: contribution à l'étude hydro-géologique du haut-Atlas occidental et de la plaine du Haouz: Thèse de Doctorat de l'Université de Lyon, section de pharmacie. Université, Faculté de Médecine et de Pharmacie.
- Renard KG (1988) Water resources of small impoundments in dry regions.
- Ressources naturelles Canada (2012) L'eau souterraine. http://geoscape.nrcan.gc.ca/h2o/bowen/underground_f.php.
- Rétháti L (1983) Groundwater in Civil Engineering. Elsevier.
- Rödiger T, Geyer S, Mallast U, et al (2014) Multi-response calibration of a conceptual hydrological model in the semiarid catchment of Wadi al Arab, Jordan. *J Hydrol* 509:193–206. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.026.
- Roose E (1996) Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants des montagnes. *Bull - Réseau Eros* 87–97.

- Roose E, Blancaneaux P, De Freitas PL (1993) Un simple test de terrain pour évaluer la capacité d'infiltration et le comportement hydrodynamique des horizons pédologiques superficiels : méthode et exemples. *Cah - ORSTOM Pédologie* 28:413–419.
- Roose E, Smolikowski B (1997) Comparaison de trois techniques de mesure de l'infiltration sur fortes pentes : monocylindre et 2 simulateurs de pluies. Application à un versant de la vallée de Godim au Cap Vert. *Bull - Réseau Eros* 282–296 multigr.
- Rosenthal E, Adar E, Issar AS, Batelaan O (1990) Definition of groundwater flow patterns by environmental tracers in the multiple aquifer system of southern Arava Valley, Israel. *J Hydrol* 117:339–368. doi: 10.1016/0022-1694(90)90100-C.
- Saghravani SR, Yusoff I, Tahir WZWM, Othman Z (2014) Comparison of water table fluctuation and chloride mass balance methods for recharge estimation in a tropical rainforest climate: a case study from Kelantan River catchment, Malaysia. *Environ Earth Sci* 73:4419–4428. doi: 10.1007/s12665-014-3727-2.
- Salomon J, Chellai EH, Guerraoui F, Lang J (1996) Dynamique sédimentaire et structuration, durant le Néogène, de la bordure nord du Haut Atlas Marocain (Haouz de Marrakech). *J Afr Earth Sci* 22:323–334. doi: 10.1016/0899-5362(96)00007-3.
- Samoradnitsky G, Taqqu MS (1994) *Stable Non-Gaussian Random Processes: Stochastic Models with Infinite Variance*. CRC Press.
- Sander P, Chesley MM, Minor TB (1996) Groundwater Assessment Using Remote Sensing And GIS In A Rural Groundwater Project In Ghana: Lessons Learned. *Hydrogeol J* 4:40–49. doi: 10.1007/s100400050086.
- Saraf AK, Choudhury PR (1998) Integrated remote sensing and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharge sites. *Int J Remote Sens* 19:1825–1841. doi: 10.1080/014311698215018.
- Scanlon BR (1991) Evaluation of moisture flux from chloride data in desert soils. *J Hydrol* 128:137–156. doi: 10.1016/0022-1694(91)90135-5.
- Segerson K, Hartwick JM, Olewiler ND (1986) The Economics of Natural Resource Use. *Land Econ* 62:422. doi: 10.2307/3146476.
- Sener E, Davraz A, Ozcelik M (2005) An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in Burdur, Turkey. *Hydrogeol J* 13:826–834. doi: 10.1007/s10040-004-0378-5.
- Servat E, Najem W, Leduc C, Shakeel A (2003) *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions: Papers Selected for the International Conference on Hydrology of the Mediterranean and Semi-Arid Regions, Held in Montpellier, France from 1 to 4 April 2003*. International Association of Hydrological Sciences.
- Service Géologique du Maroc (1957) *Carte géologique du Maroc, Feuille Marrakech*.
- Shaban A, Khawlie M, Abdallah C (2006) Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeol J* 14:433–443. doi: 10.1007/s10040-005-0437-6.
- Shepherd RG (1989) Correlations of Permeability and Grain Size. *Ground Water* 27:633–638. doi: 10.1111/j.1745-6584.1989.tb00476.x.

- Sinan M (1986) Paramètres hydrogéologiques et géotechniques en milieu alluvial fortement hétérogène: Relations statistiques et approche géostatistique comparative. (Exemple de la nappe du Haouz Maroc). Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- Sinan M (2000) Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par couplage des SIG, de la géophysique et de la géostatistique. Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc). Thèse de Doctorat d'Etat, Université Mohammed V.
- Slimani S, Massei N, Mesquita J, et al (2009) Combined climatic and geological forcings on the spatio-temporal variability of piezometric levels in the chalk aquifer of Upper Normandy (France) at pluridecennial scale. *Hydrogeol J* 17:1823. doi: 10.1007/s10040-009-0488-1
- Smith LC, Turcotte DL, Isacks BL (1998) Stream flow characterization and feature detection using a discrete wavelet transform. *Hydrol Process* 12:233–249. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(199802)12:2<233::AID-HYP573>3.0.CO;2-3.
- Solomon S, Quiel F (2006) Groundwater study using remote sensing and geographic information systems (GIS) in the central highlands of Eritrea. *Hydrogeol J* 14:1029–1041. doi: 10.1007/s10040-006-0096-2.
- Somaratne N, Smettem KRJ (2014) Theory of the generalized chloride mass balance method for recharge estimation in groundwater basins characterised by point and diffuse recharge. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 11:307–332. doi: 10.5194/hessd-11-307-2014.
- Sophocleous MA (1991) Combining the soilwater balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge: Practical aspects. *J Hydrol* 124:229–241. doi: 10.1016/0022-1694(91)90016-B.
- Stigter TY, Carvalho Dill AMM, Ribeiro L, Reis E (2006) Impact of the shift from groundwater to surface water irrigation on aquifer dynamics and hydrochemistry in a semi-arid region in the south of Portugal. *Agric Water Manag* 85:121–132. doi: 10.1016/j.agwat.2006.04.004.
- Subyani AM, Şen Z (2006) Refined chloride mass-balance method and its application in Saudi Arabia. *Hydrol Process* 20:4373–4380. doi: 10.1002/hyp.6172.
- Subyani AM (2004) Use of chloride mass-balance and environmental isotopes for evaluation of groundwater recharge in the alluvial aquifer, Wadi Tharad, western Saudi Arabia. *Environ Geol* 46:741–749. doi: 10.1007/s00254-004-1096-y.
- Swift Jr LW, Cunningham GB, Douglass JE (1988) Climatology and Hydrology. In: Swank WT, Crossley Jr DA (eds) *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*. Springer New York, pp 35–55.
- Takounjou AF, Ngoupayou JRN, Riotte J, et al (2010) Estimation of groundwater recharge of shallow aquifer on humid environment in Yaounde, Cameroon using hybrid water-fluctuation and hydrochemistry methods. *Environ Earth Sci* 64:107–118. doi: 10.1007/s12665-010-0822-x.
- Taupin JD (1990) Evaluation isotopique de l'évaporation en zone non saturée sous climat sahélien et évolution géochimique des solutions du sol (Vallée du Moyen Niger). Thèse de Doctorat d'Etat Es-Sciences, Université de Paris X ORSAY.
- Teeuw RM (1995) Groundwater Exploration Using Remote Sensing And A Low-Cost Geographical Information System. *Hydrogeol J* 3:21–30. doi: 10.1007/s100400050057.

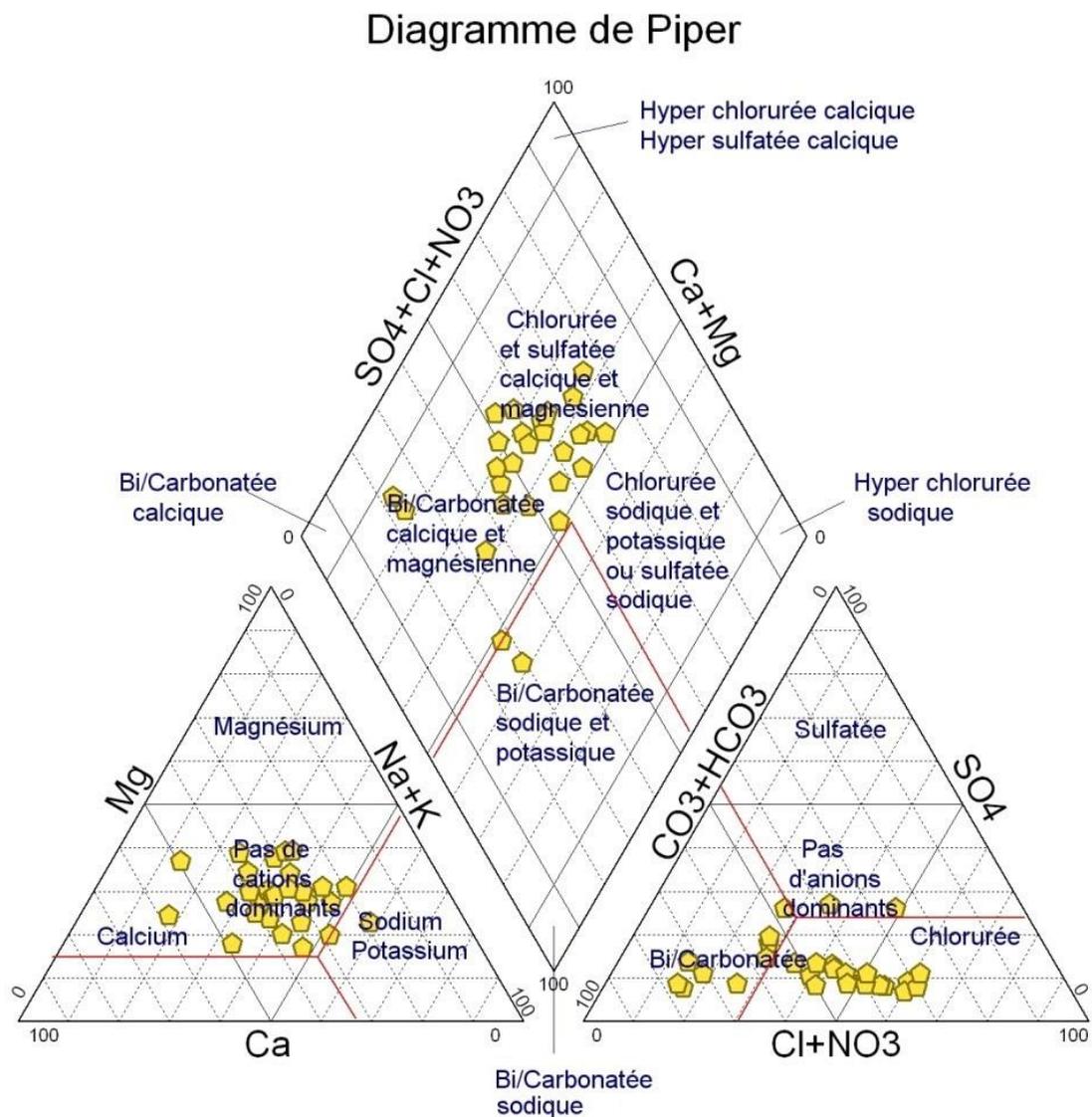
- Tetia A (1990) Revue critique des méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Contribution de l'approche géochimique et isotopique. Thèse de 3ème cycle, Université de Dakar.
- Thiem G (1906) Hydrologische Methoden. Gebhardt.
- Thomas A, Sharma P., Sharma M., Anil S (1999) Hydrogeomorphological mapping in assessing groundwater by using remote sensing data—A case study in Lehra Gage Block, Sangrur district, Punjab. *J Indian Soc Remote Sens* 27:31–42.
- Thuille G (1957) Nappe phréatique du Haouz, essai de classification hydrogéologique, exploitation sur 10 ans. MTPC/DH/DRE.
- Ting C-S, Kerh T, Liao C-J (1998) Estimation of groundwater recharge using the chloride mass-balance method, Pingtung Plain, Taiwan. *Hydrogeol J* 6:282–292. doi: 10.1007/s100400050151.
- Tiwari A, Rai B (1996) Hydromorphological mapping for groundwater prospecting using landsat e MSS imagesda case study of Part of Dhanbad District, Bihar. *J Indian Soc Remote Sens* 24:281–285.
- Torvik R (2002) Natural resources, rent seeking and welfare. *J Dev Econ* 67:455–470. doi: 10.1016/S0304-3878(01)00195-X.
- Turc L (1961) Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Ann Agron* 12:13–49.
- Tweed SO, Leblanc M, Webb JA, Lubczynski MW (2007) Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments, southeastern Australia. *Hydrogeol J* 15:75–96. doi: 10.1007/s10040-006-0129-x.
- Venkatesh M (2012) Watershed and Stream Network Delineation using ArcHydro Tools.
- Walter Fogg M. (1935) Villages and Suqs in the high atlas mountains of morocco. *Scott Geogr Mag* 51:144–151. doi: 10.1080/00369223508734971.
- Wang W-C, Chau K-W, Cheng C-T, Qiu L (2009) A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series. *J Hydrol* 374:294–306. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.019.
- Watson DF, Philip GM (1985) A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geo-Process* 2:315–327.
- Welch AH, Stollenwerk KG (2003) *Arsenic in Ground Water: Geochemistry and Occurrence*. Springer Science & Business Media.
- Welch R, Remillard M, Alberts J (1992) *Integration of Gps, Remote Sensing, and Gis Techniques for Coastal Resource Management*.
- Wikipédia, Ondelette. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ondelette>.
- Willmott CJ (1982) Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bull Am Meteorol Soc* 63:1309–1313. doi: 10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2.
- Willmott CJ, Ackleson SG, Davis RE, et al (1985) Statistics for the evaluation and comparison of models. *J Geophys Res* 90:8995. doi: 10.1029/JC090iC05p08995.

- Willmott CJ, Matsuura K (2005) Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Clim Res* 30:79–82. doi: 10.3354/cr030079.
- Wood WW (2014) Interactive comment on “Theory of the generalized chloride mass balance method for recharge estimation in groundwater basins characterised by point and diffuse recharge” by N. Somaratne and K. R. J. Smettem. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 11:C19–C21.
- Wood WW (1999) Use and Misuse of the Chloride-Mass Balance Method in Estimating Ground Water Recharge. *Ground Water* 37:2–3. doi: 10.1111/j.1745-6584.1999.tb00949.x.
- Wood WW, Rainwater KA, Thompson DB (1997) Quantifying Macropore Recharge: Examples from a Semi-Arid Area. *Ground Water* 35:1097–1106. doi: 10.1111/j.1745-6584.1997.tb00182.x.
- Wood WW, Sanford WE (1995) Chemical and Isotopic Methods for Quantifying Ground-Water Recharge in a Regional, Semiarid Environment. *Ground Water* 33:458–468. doi: 10.1111/j.1745-6584.1995.tb00302.x.
- Worch E (2003) *Hydrochemistry: Basic Concepts and Exercises*, De Gruyter.
- Xiao J, Jin Z-D, Ding H, et al (2012) Geochemistry and solute sources of surface waters of the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau. *J Asian Earth Sci* 54–55:162–173. doi: 10.1016/j.jseaes.2012.04.009.
- Xiao J, Jin Z-D, Wang J (2014) Geochemistry of trace elements and water quality assessment of natural water within the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW China. *J Geochem Explor* 136:118–126. doi: 10.1016/j.gexplo.2013.10.013.
- Xu Y, Usher B (2006) *Groundwater Pollution in Africa*. CRC Press.
- Yang W, Wang R, Huang J, et al (2007) Application of inverse distance weighted interpolation method in contaminated site assessment. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao J Appl Ecol Zhongguo Sheng Tai Xue Xue Hui Zhongguo Ke Xue Yuan Shenyang Ying Yong Sheng Tai Yan Jiu Suo Zhu Ban* 18:2013–2018.
- Zhang B, Song X, Zhang Y, et al (2012) Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen plain, Northeast China. *Water Res* 46:2737–2748. doi: 10.1016/j.watres.2012.02.033.

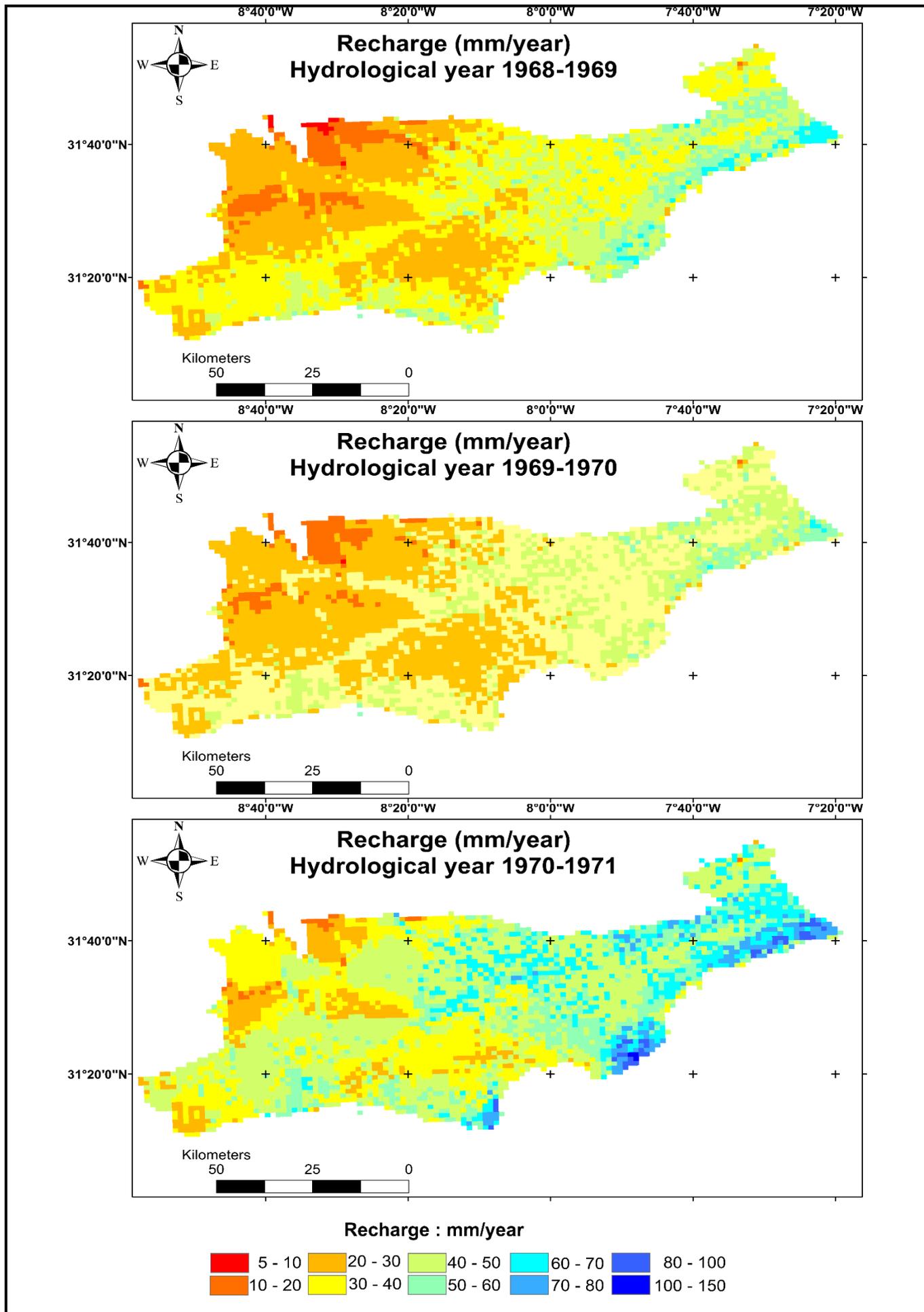
ANNEXES

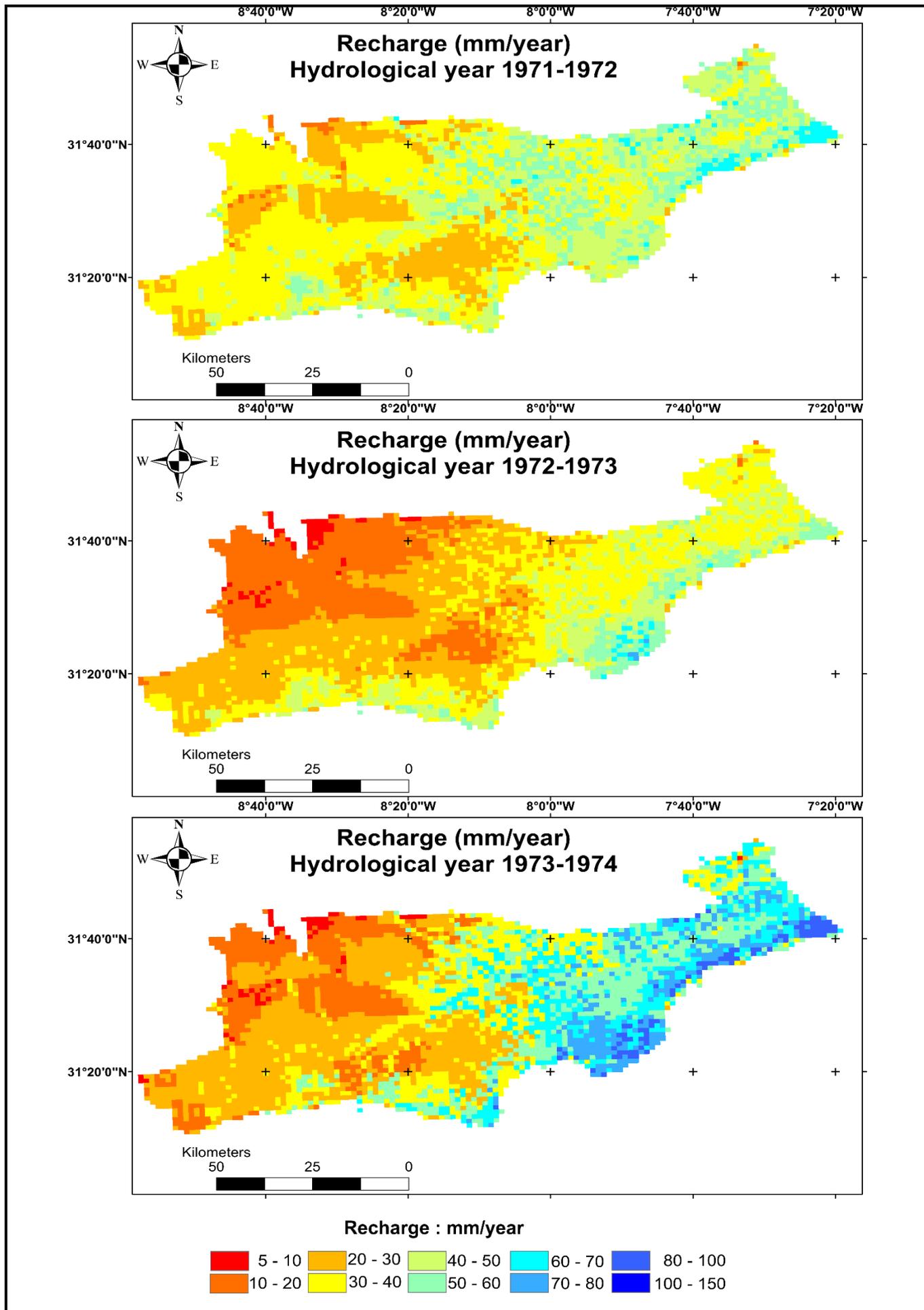
ANNEXE 1. DIAGRAMME DE PIPER DES ANALYSES CHIMIQUES DU CHAPITRE 4.

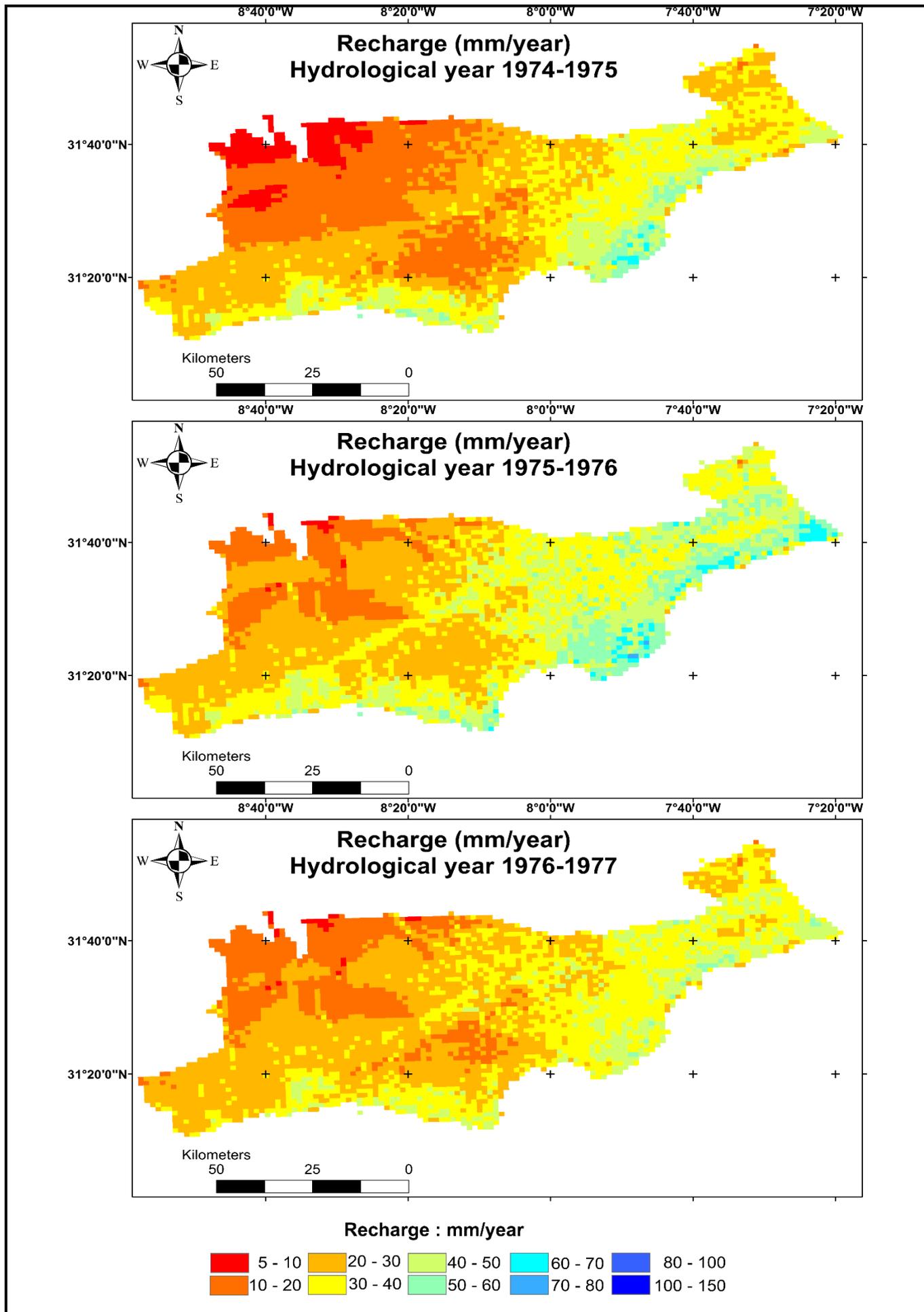
Les analyses chimiques des eaux souterraines effectuées durant janvier 2012 pour les traitements du 4^{ème} chapitre concernant le bilan des chlorures, tableau 13 (pages : 101-102).

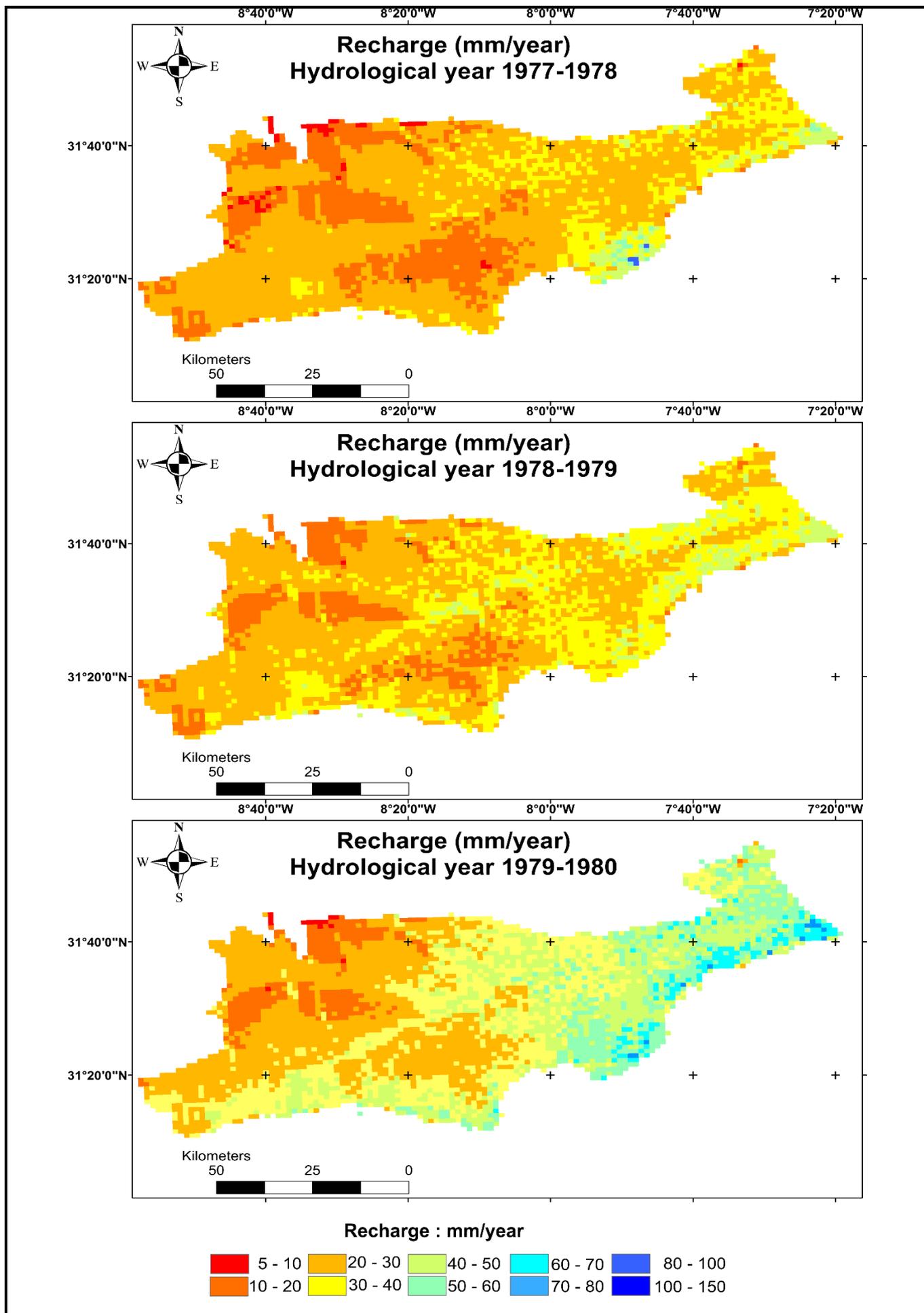


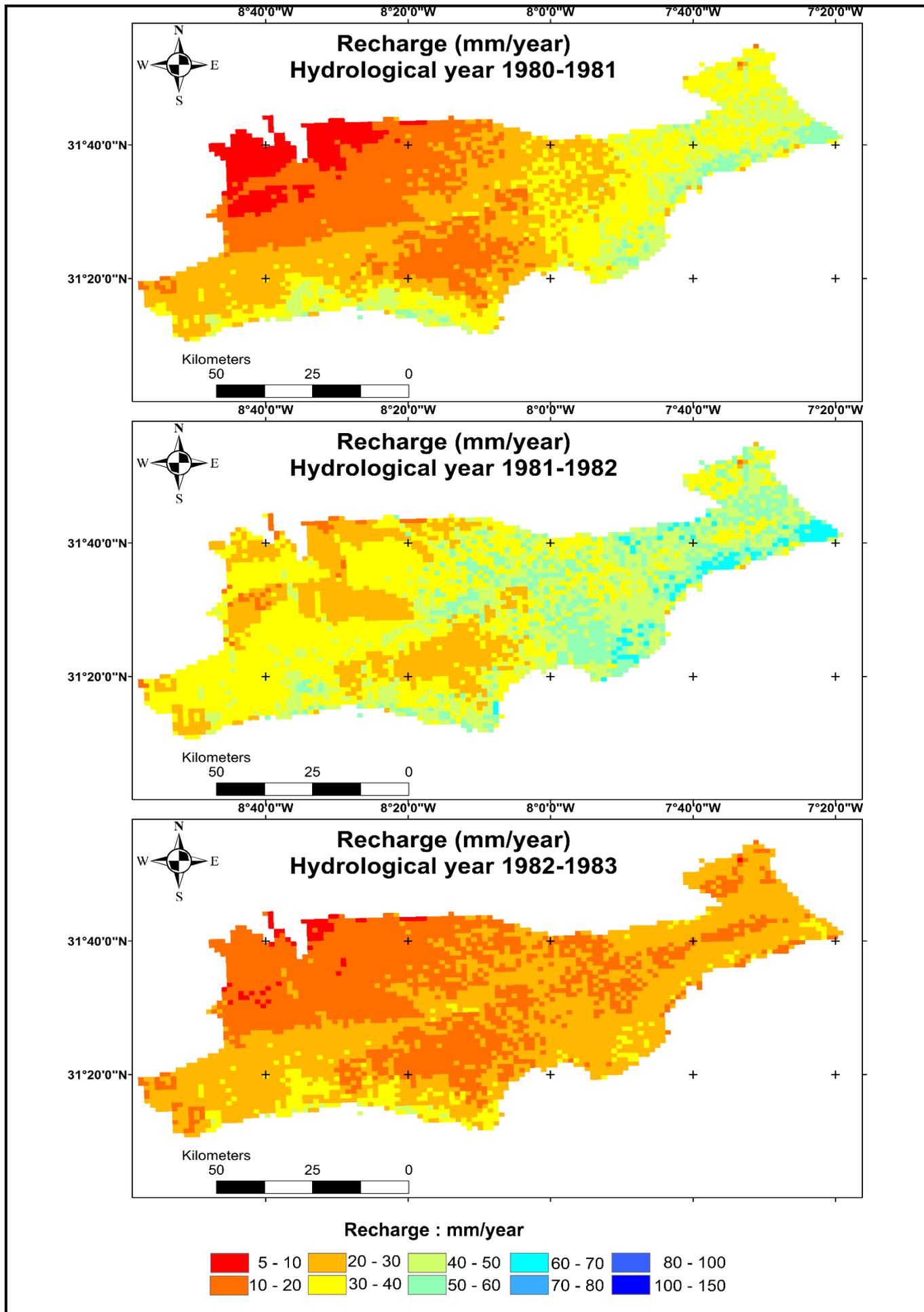
**ANNEXE 2. CARTES DE DISTRIBUTION SPATIALE
DE LA RECHARGE EMPIRIQUE POUR 45 ANS (1967-2012)**

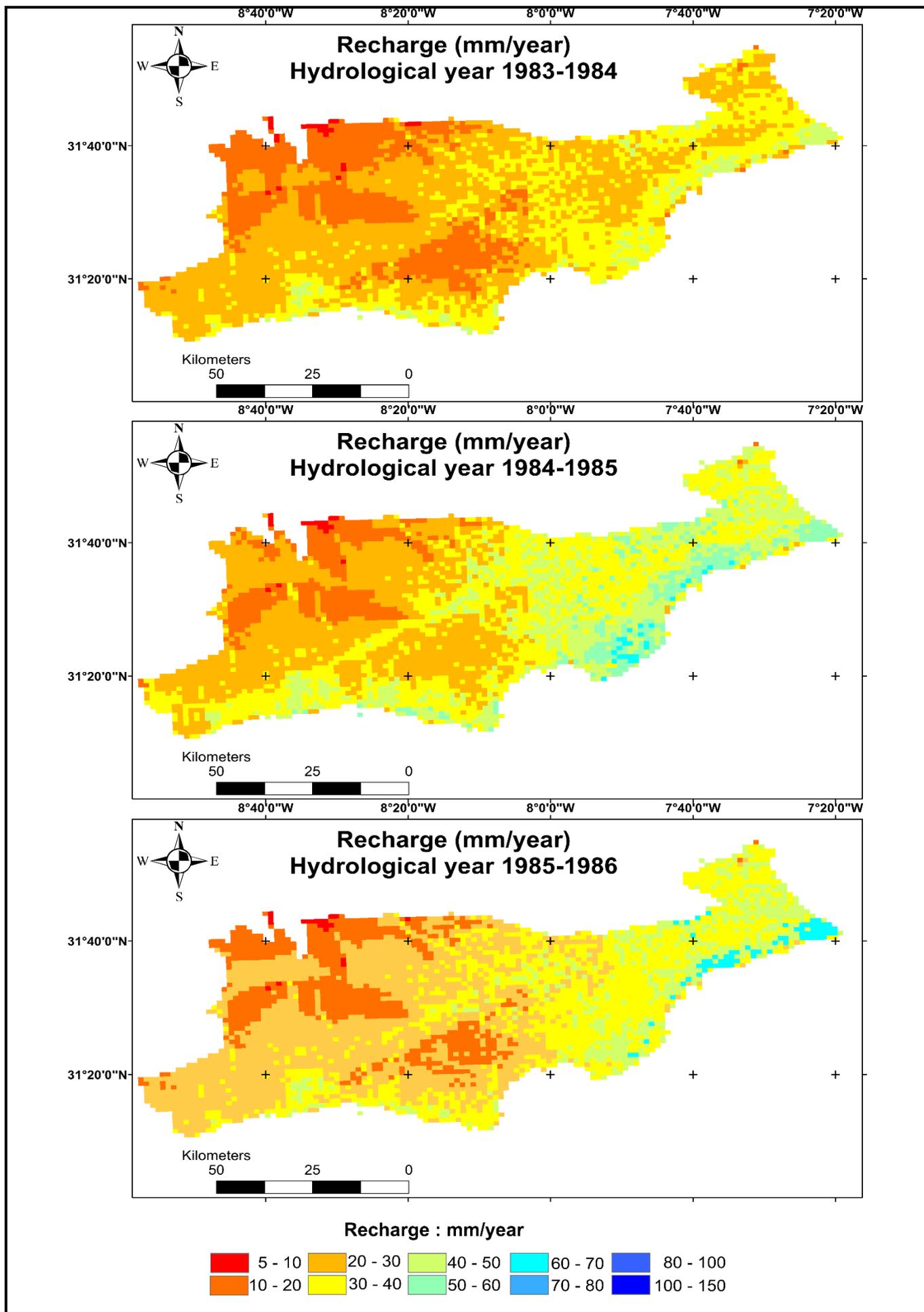


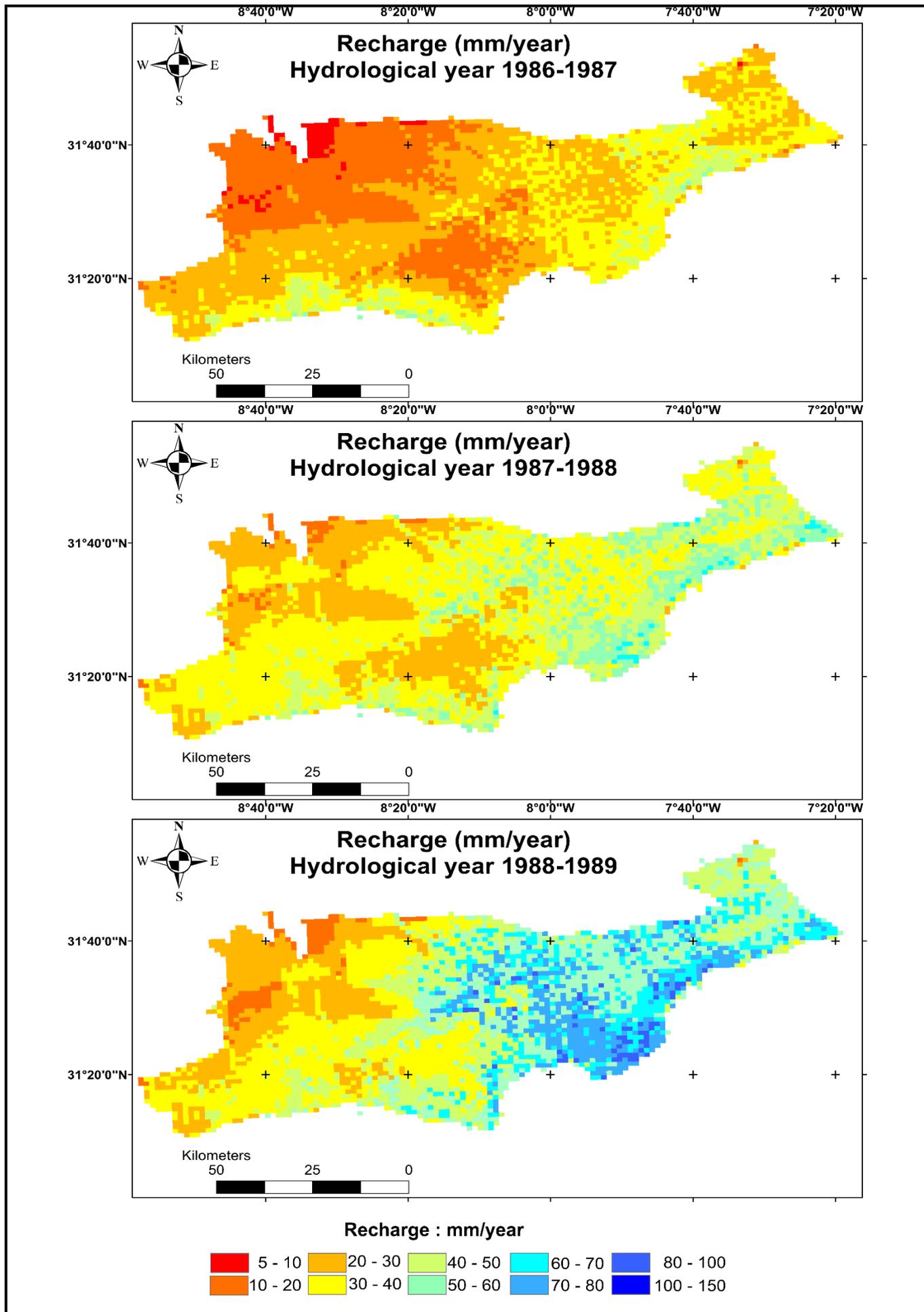


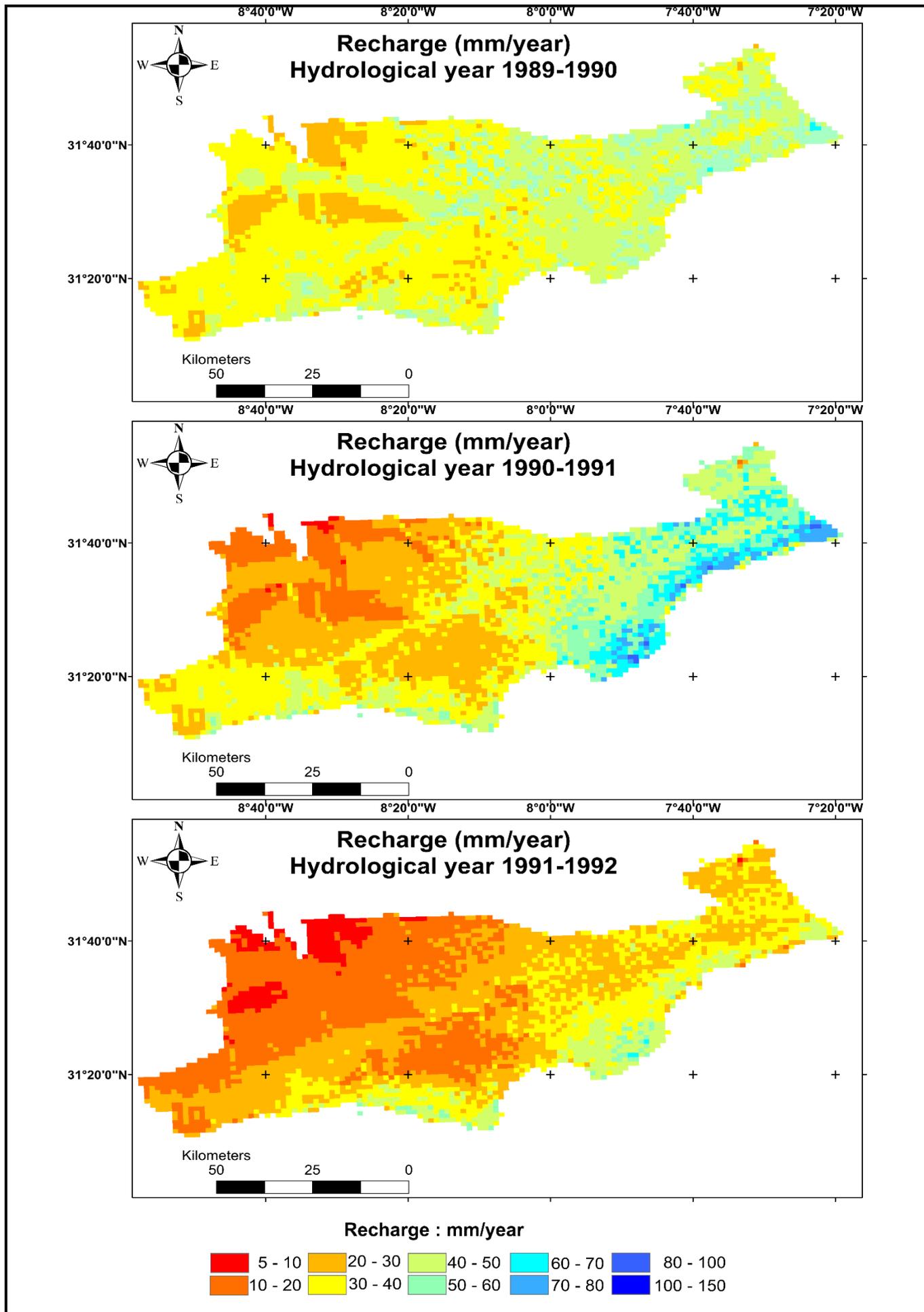


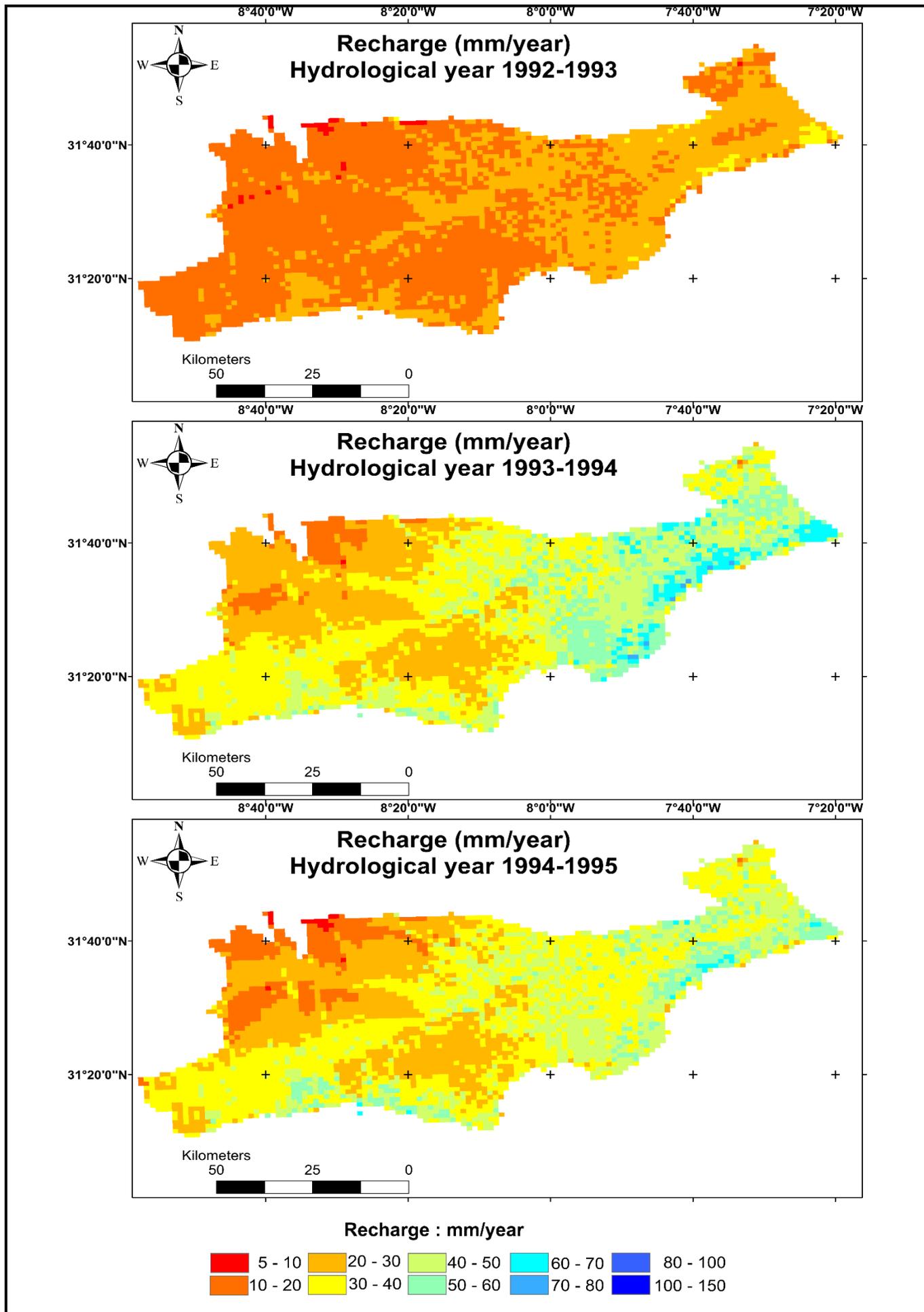


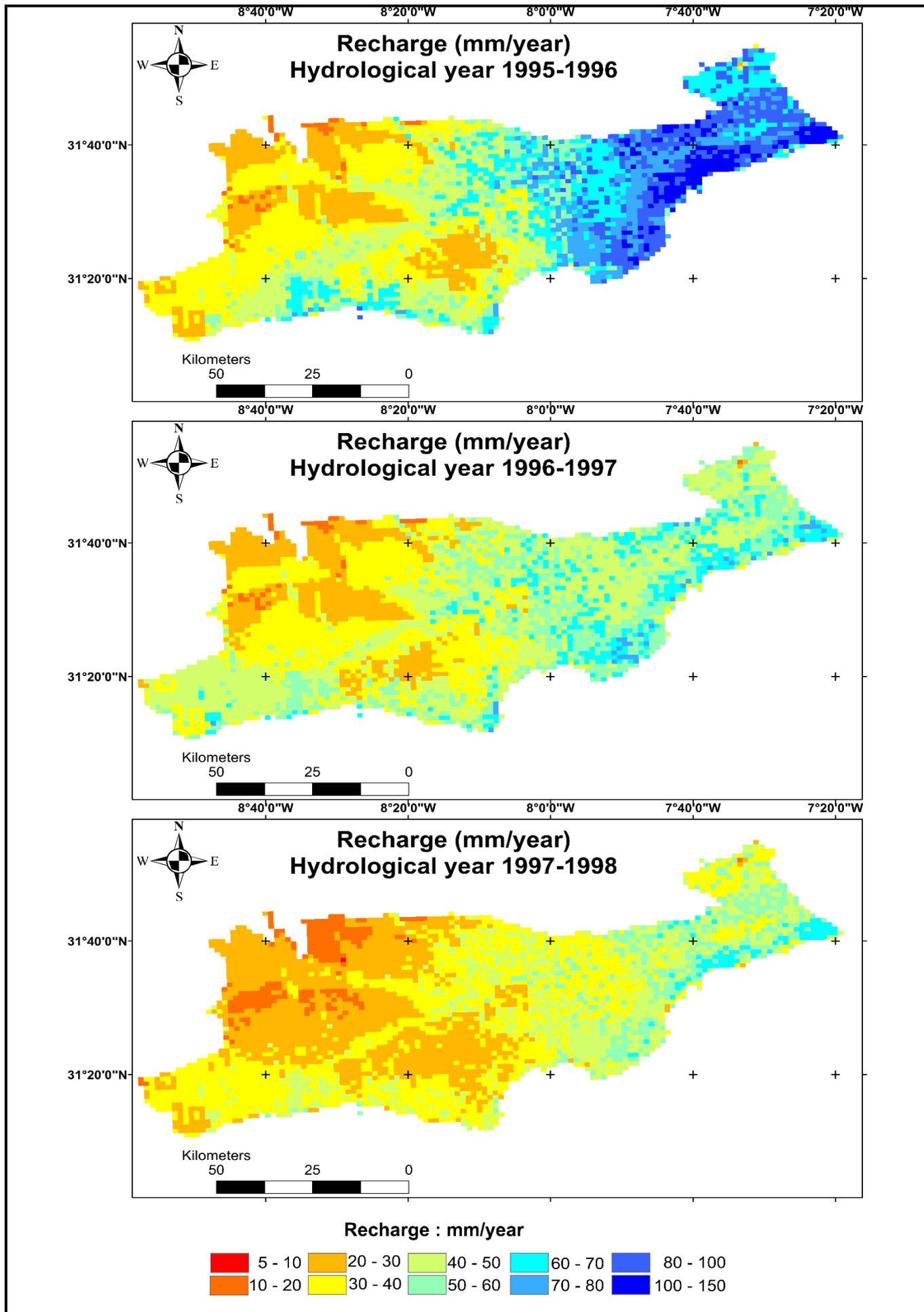


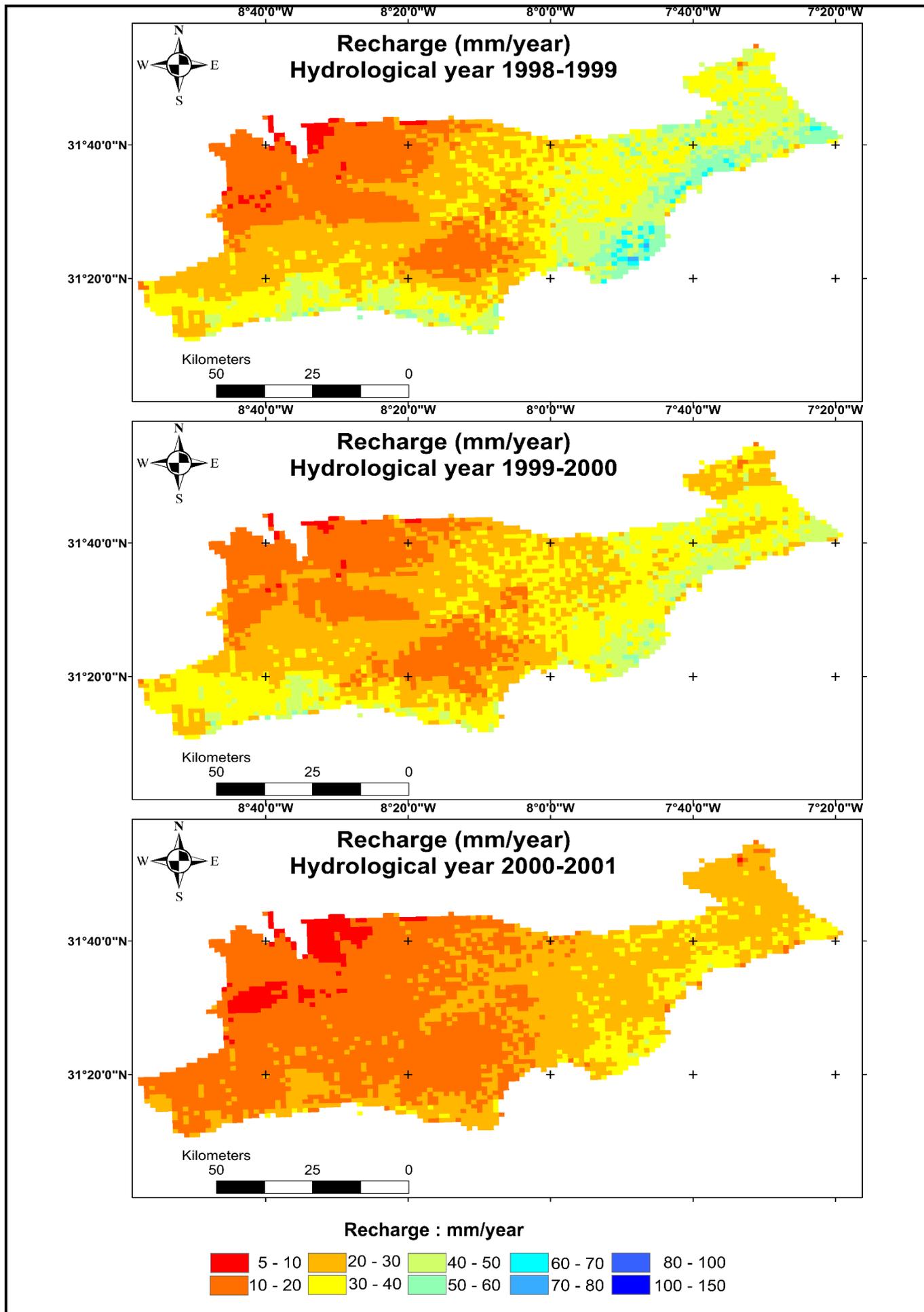


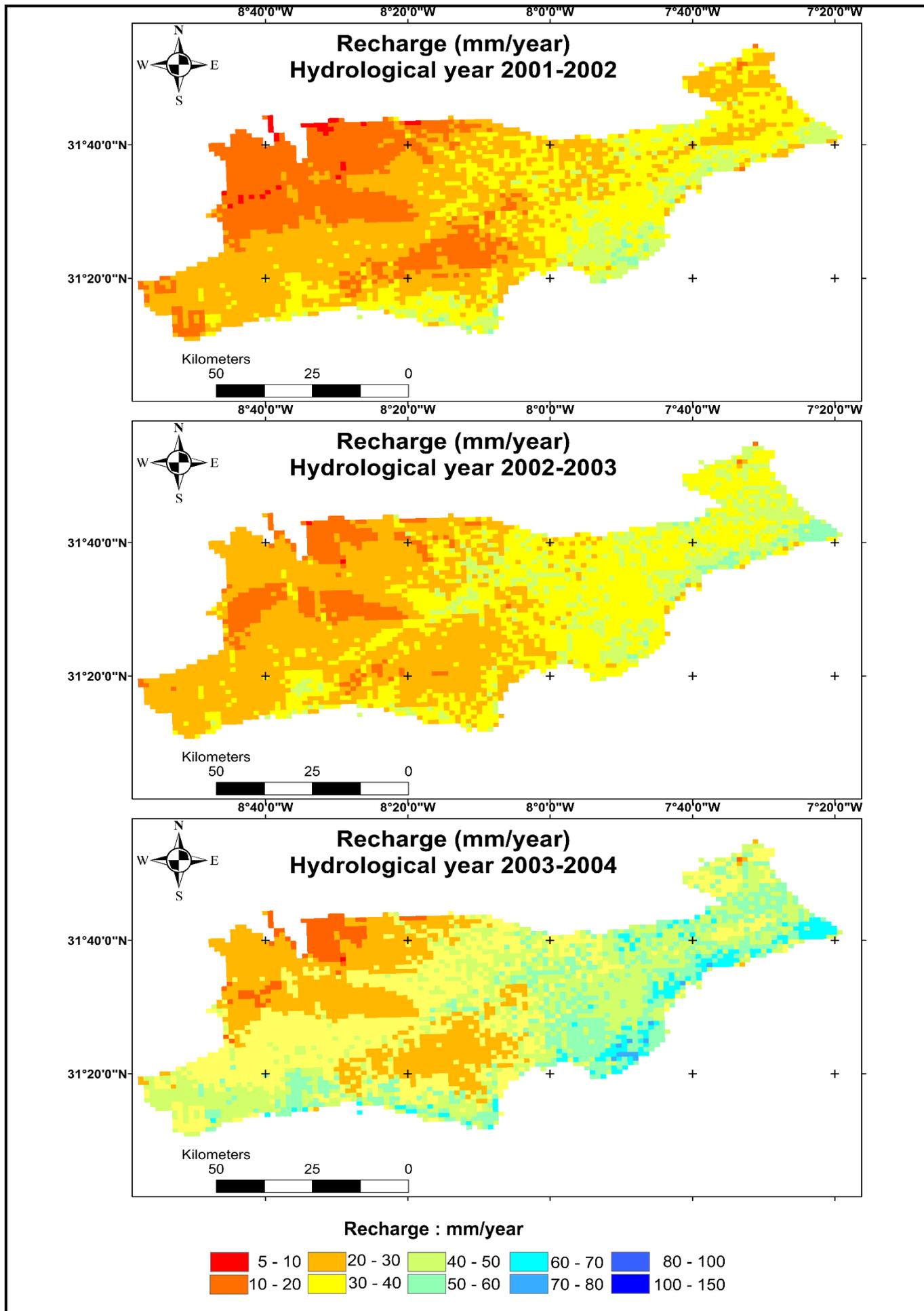


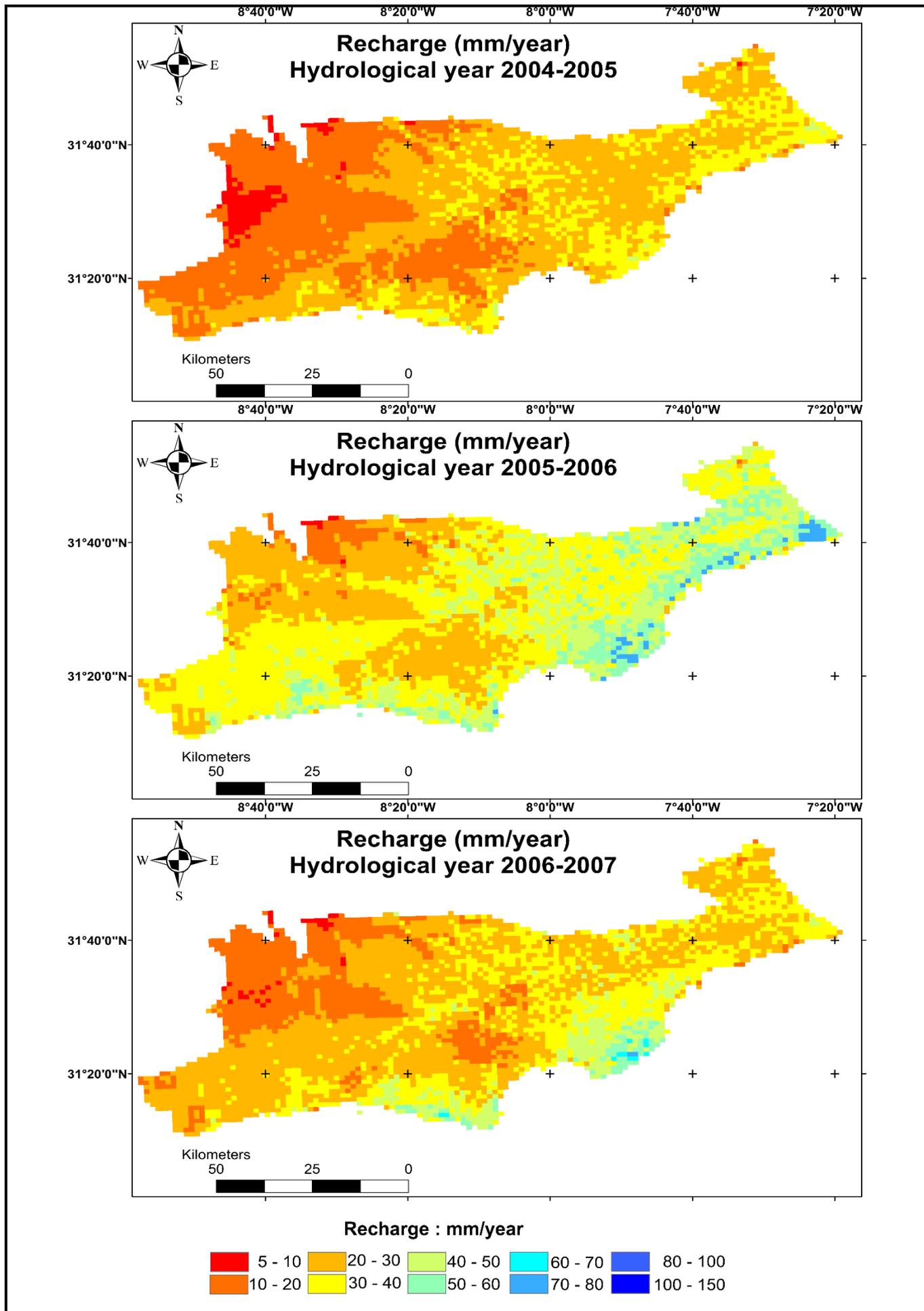


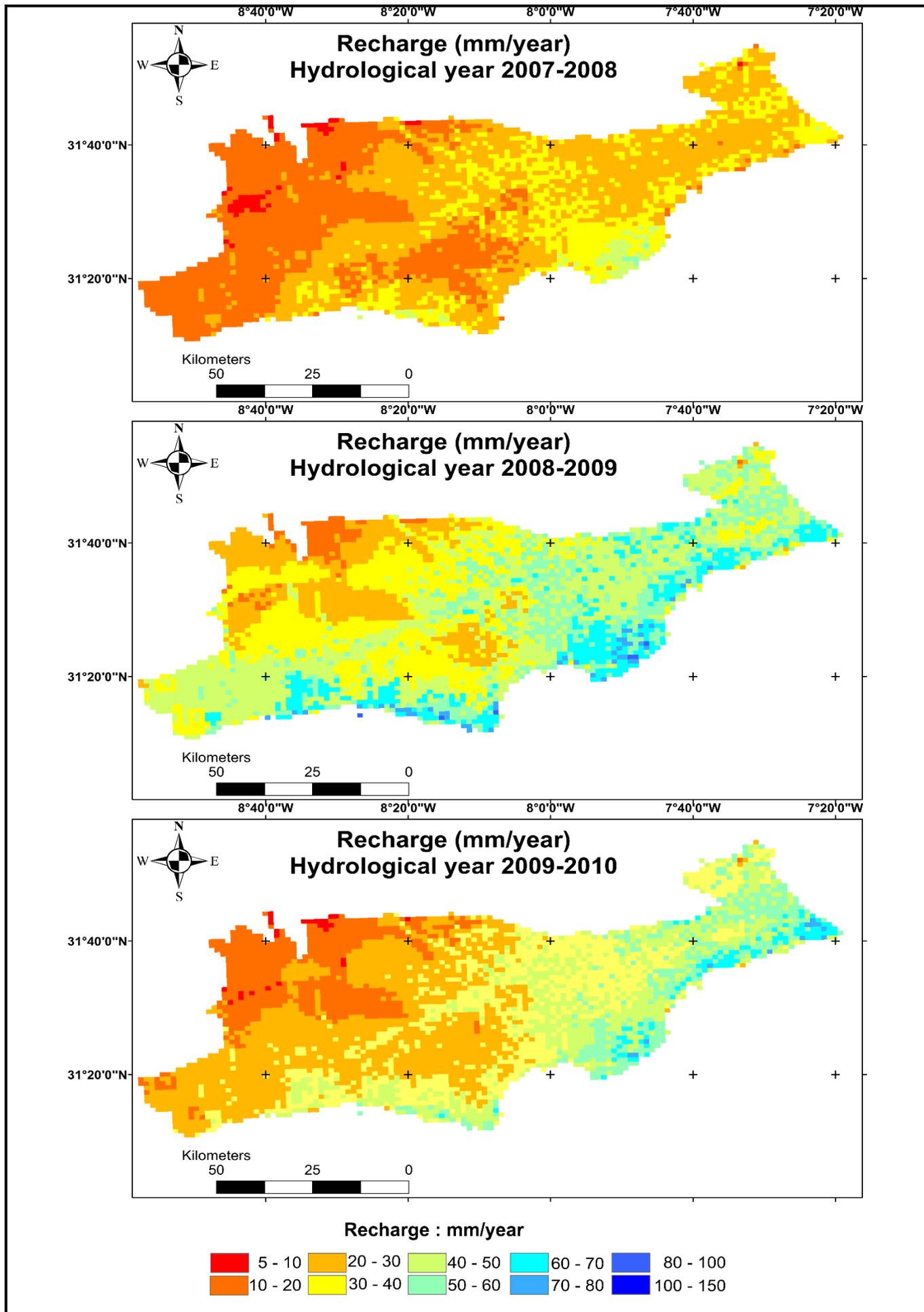


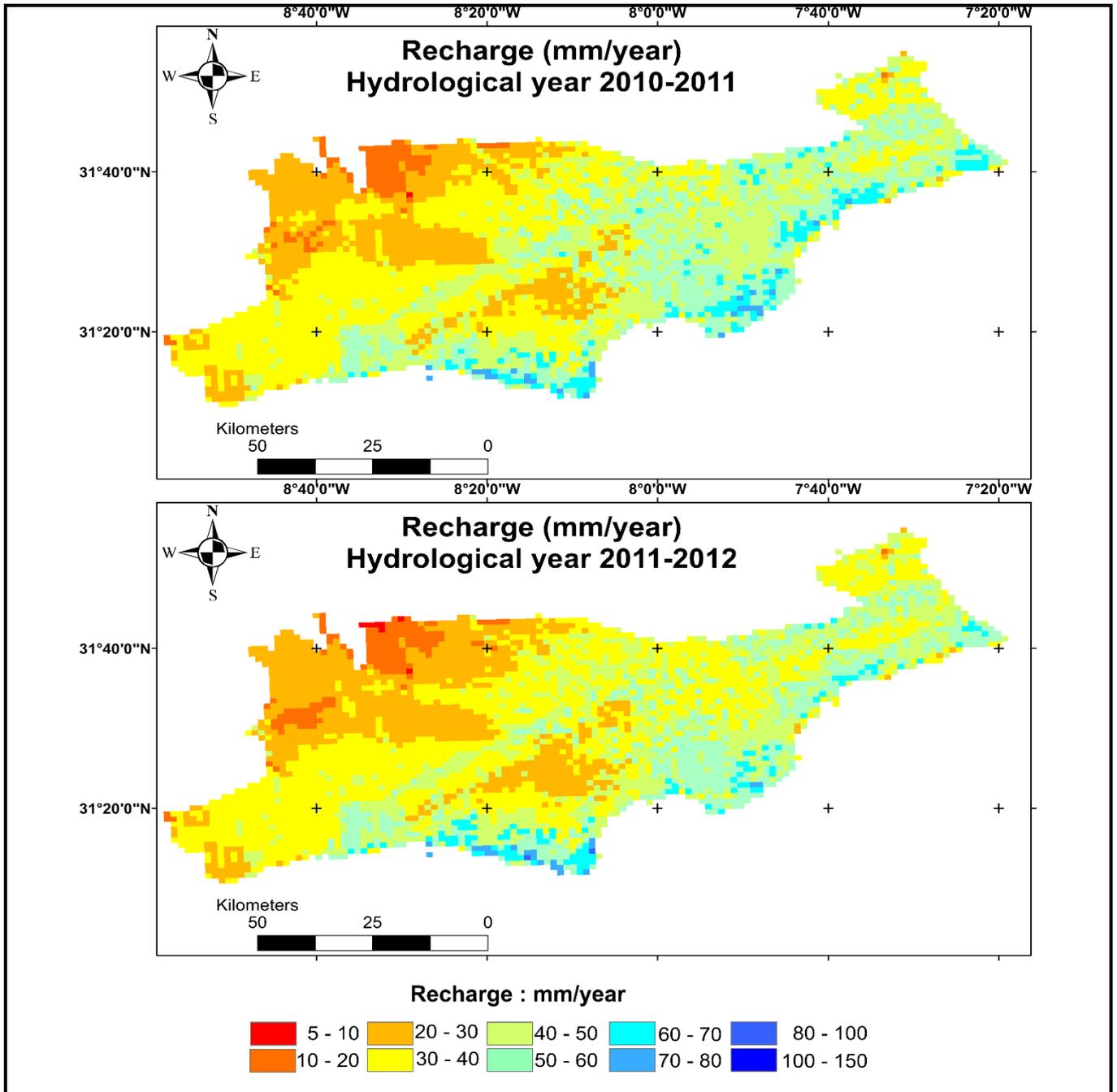












RÉSUMÉ

Le Maroc, situé à l'extrême nord-ouest de l'Afrique, présente un climat aride et semi-aride sur la majorité de son territoire, où les précipitations sont très insuffisantes, généralement au-dessous de 300 mm/an avec une sécheresse progressive pendant les dernières décennies. Les apports annuels ne couvrent guère la demande en eau résultant de l'urbanisation, de l'agriculture, de l'industrie et du tourisme. La plaine du Haouz, au centre du Royaume, en est un exemple. Une gestion durable nécessite une gouvernance rigoureuse des ressources et des usages. Le taux de recharge des aquifères est un concept fondamental dans toute quantification de la ressource et sa gestion durable. Les outils d'aide à la décision reposent sur ce taux.

La présente étude a pour objectif de développer un modèle empirique de quantification de la recharge en se basant sur une analyse multicritères qui réunit les facteurs majeurs et mineurs déterminant l'infiltration potentielle. La méthodologie repose sur l'utilisation d'un Système d'Information Géographique, appuyé par la télédétection, pour générer des couches de données thématiques. Ces dernières concernent la variation spatiale des différents paramètres déterminant la recharge, les intégrant et les analysant pour en déduire la recharge potentielle spatialisée de l'aquifère. Cette approche a permis de déterminer le taux de recharge du Haouz (6 200 km²) allant de 3,5 à 19 %.

Ce travail repose aussi sur l'estimation du taux de recharge de l'aquifère au piémont liant le Haut Atlas et la plaine du Haouz Central par une méthode hydrochimique s'appuyant sur la relation développée par Eriksson et Khunakasem en 1969 : *Chloride Mass-Balance Method*. Il s'agit d'une procédure reposant sur la relation entre la concentration en chlorure des eaux souterraines et celle des eaux pluviales. La nouveauté de cette étude résulte de l'utilisation d'un Système d'Information Géographique permettant de calculer la recharge régionale des 400 km² du périmètre étudié. Cette approche a permis d'obtenir le taux de recharge spatialisé sous forme de carte, allant de 13 à 100 mm/an pour l'année hydrologique 2011–2012. Ce résultat permet aussi de valider les modèles empiriques sur de larges superficies dépassant les 6 200 km² comme la nappe du Haouz. En utilisant les données de l'année hydrologique précédente, le modèle assure des marges d'erreur inférieure à 15,5 %.

Mot clés : Recharge des aquifères ; Modèle empirique ; Système d'Information Géographique ; Télédétection; Chloride Mass-Balance Method (CMB) ; Climat aride et semi-aride ; Plaine du Haouz (Royaume du Maroc).